



## AVANCES EN LA BIOESTRATIGRAFÍA DE ALTA RESOLUCIÓN DE LA FORMACIÓN VACA MUERTA: AMONITES Y NANOFÓSILES CALCÁREOS INTEGRANDO DATOS DE SUBSUELO Y DE AFLORAMIENTOS

Verónica VENNARI<sup>1</sup>, Marina LESCANO<sup>2</sup>, Beatriz AGUIRRE-URRETA<sup>2</sup>, Andrea CONCHEYRO<sup>2</sup>, Manuel FANTÍN<sup>3</sup>, María Dolores VALLEJO<sup>4</sup>, Gabriela DEPINE<sup>5</sup>, Guillermina SAGASTI<sup>6</sup>, Alfredo AMBROSIO<sup>7</sup>

<sup>1</sup>Grupo vinculado al Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (IANIGLA-CONICET), Museo de Historia Natural de San Rafael, Mendoza, Argentina. Email: vvennari@mendoza-conicet.gob.ar,

<sup>2</sup>Instituto de Estudios Andinos Don Pablo Groeber (IDEAN, UBA-CONICET). Departamento de Ciencias Geológicas, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires. Email: lescano@gl.fcen.uba.ar, aguirre@gl.fcen.uba.ar; andrea@gl.fcen.uba.ar

<sup>3</sup>Email: manuefantin@yahoo.com

<sup>4</sup>Chevron Argentina. Email: mdvallejo@chevron.com

<sup>5</sup>Shell Exploration and Production Company. Email: gabriela.depine@shell.com

<sup>6</sup>YPF S.A. E- mail: gsagastic@ypf.com <sup>7</sup>Geoandina SRL. Email: alfredo.ambrosio@geoandina.com

### RESUMEN

En esta contribución se presenta una integración de los estudios bioestratigráficos de alta resolución realizados con amonites y nanofósiles calcáreos de la Formación Vaca Muerta (Tithoniano - Valanginiano temprano), a partir de cinco secciones de superficie y ocho sondeos analizados en colaboración con diferentes empresas petroleras, todos ellos situados en el ámbito de la cuenca Neuquina. La bioestratigrafía realizada ha permitido ajustar aún más la edad de la Formación Vaca Muerta en la citada cuenca y consolidar la correlación establecida con los registros tethyanos de ambos grupos fósiles para el intervalo Tithoniano - Berriasiano.

**Palabras clave:** Jurásico, Cretácico, Grupo Mendoza, Cuenca Neuquina.

### ABSTRACT

*Progress in high resolution biostratigraphy of the Vaca Muerta Formation: ammonites and calcareous nannofossils integrating surface and outcrop data.* An integration of high resolution biostratigraphic studies based on ammonites and calcareous nannofossils of the Vaca Muerta Formation (Tithonian–early Valanginian) is here presented. The samples are from five surface sections and eight wells analyzed in cooperation with different oil companies. The study sites are situated within the Neuquén Basin. The present biostratigraphic study has not only allowed the fine-tuning of the age of the Vaca Muerta Formation but also consolidated the established correlation with the Tethyan records of both fossil groups for the Tithonian–Berriasian time period.

**Keywords:** Jurassic, Cretaceous, Mendoza Group, Neuquén Basin.

### INTRODUCCIÓN

En los últimos años se han realizado numerosos estudios multidisciplinarios en secciones de superficie dentro del ámbito de la cuenca Neuquina (e.g. Lescano y Concheyro 2014, Vennari *et al.* 2014, Aguirre Urreta *et al.* 2015), que han proporcionado tanto avances significativos en la correlación bioestratigráfica con amonites y nanofósiles calcáreos como un buen ajuste de las edades obtenidas. En esta contribución se reúne información proveniente de diferentes secciones de afloramiento y

subsuelo de la cuenca. En todas ellas se consideraron las sucesivas asociaciones de amonites y los bioeventos de nanofósiles calcáreos reconocidos, a partir de robustos estudios taxonómicos.

Las secciones de superficie están situadas en el sur de Mendoza y en el norte de Neuquén. Complementariamente se contó con material proveniente de coronas y *cuttings* de sondeos perforados en el sector neuquino de la cuenca (Concheyro 2012a, b y c, Aguirre-Urreta y Vennari 2013a y b, Aguirre-Urreta *et al.* 2014, Desjardins y Aguirre 2016, Vallejo *et al.* 2016).

La diversidad y abundancia de las asociaciones de amonites registradas en la Formación Vaca Muerta han permitido construir un detallado esquema biozonal (véase Aguirre-Urreta *et al.* 2014) correlacionable con el estándar mediterráneo (Reboulet *et al.* 2014, Riccardi 2015). Asimismo, el análisis reciente de los nanofósiles calcáreos ha resultado valioso para datar estas secuencias marinas. Para las sedimentitas de la Formación Vaca Muerta se han identificado diferentes bioeventos de nanofósiles calcáreos asignables al Tithoniano y Berriasiano comparables con el esquema biozonal de la región Mediterránea (Aguirre-Urreta *et al.* 2005, Concheyro *et al.* 2007, Kietzmann *et al.* 2011, Lescano 2011, Lescano y Concheyro 2014, Vennari *et al.* 2014).

## MARCO GEOLÓGICO

La cuenca Neuquina es una cuenca de retroarco situada en la región occidental de Argentina. Su geología ha sido ampliamente descrita por Legarreta y Gulisano (1989) y Legarreta y Uliana (1999) y su columna sedimentaria comprende estratos meso y cenozoicos. Los estratos jurásico-cretácicos alcanzan un espesor de hasta 4.000 m en algunos depocentros.

La Formación Vaca Muerta, definida por Weaver (1931), posee la mayor extensión geográfica, tanto en superficie como en subsuelo de la cuenca Neuquina (Leanza *et al.* 2011). Su potencial hidrocarbúfero ha sido largamente reconocido (Uliana y Legarreta 1993) y hoy día es objeto de exploración y desarrollo no convencional en su carácter de reservorio tipo *shale-oil* y *shale gas* (Vallejo y González 2016).

## METODOLOGÍA

En esta contribución las secciones de superficie analizadas comprenden, de norte a sur: Arroyo Durazno (35° 05' S, 69° 45' O), Las Loicas (35° 47' S, 70° 09' O) y Sierra de la Cara Cura (subsección Norte: 36° 39' S, 69° 39' O; subsección Sur: 36° 40' S, 69° 40' O), en Mendoza; y Quebrada Maravilla (36° 28' S, 70° 12' O) y La Yesera (37° 18' S, 69° 53' O), en Neuquén (Figs. 1a, b). Las secciones de subsuelo estudiadas incluyen: tres pozos del yacimiento El Trapial (ET. xp-2001, xp-2002, xp-2006), de Chevron Argentina; dos pozos (Sierras Blancas y Águila Mora) de Shell Oil y tres pozos (A, B y C) de YPF SA.

El esquema bioestratigráfico de amonites andinos para el intervalo Jurásico Tardío - Cretácico Temprano está basado principalmente en biozonas de asociación (Riccardi 2015 y referencias allí citadas), aunque existen propuestas de biozonas de mayor resolución para el Tithoniano temprano, realizadas en superficie (Zeiss y Leanza 2010, Vennari 2016). Los amonites se hallan preservados en tres dimensiones o como impresiones con grado variable de distorsión. En el caso de los estudios de subsuelo, la presencia de extensos intervalos estériles en amonites o sin especies índices, dificulta precisar la

extensión de las biozonas representadas. El análisis taxonómico de los amonites preservados en coronas se ha basado en escasos ejemplares por nivel o bien en impresiones de ejemplares fragmentarios, lo que ha resultado en algunas determinaciones taxonómicas abiertas.

Los nanofósiles calcáreos registrados en los perfiles y sondeos analizados presentan características cosmopolitas o con una marcada afinidad con el Reino del Tethys, que ha permitido utilizar las biozonas tethyanas (Bralower *et al.* 1989) bajo las siglas NJ (Jurásico), NJK (límite Tithoniano - Berriasiano) y NK (Cretácico Temprano). De este modo se han destacado los bioeventos principales que delimitan las biozonas y sub-biozonas identificadas y, conjuntamente con otros bioeventos utilizados en la literatura mundial, se ha ajustado el intervalo en estudio.

## RESULTADOS

### Tithoniano temprano

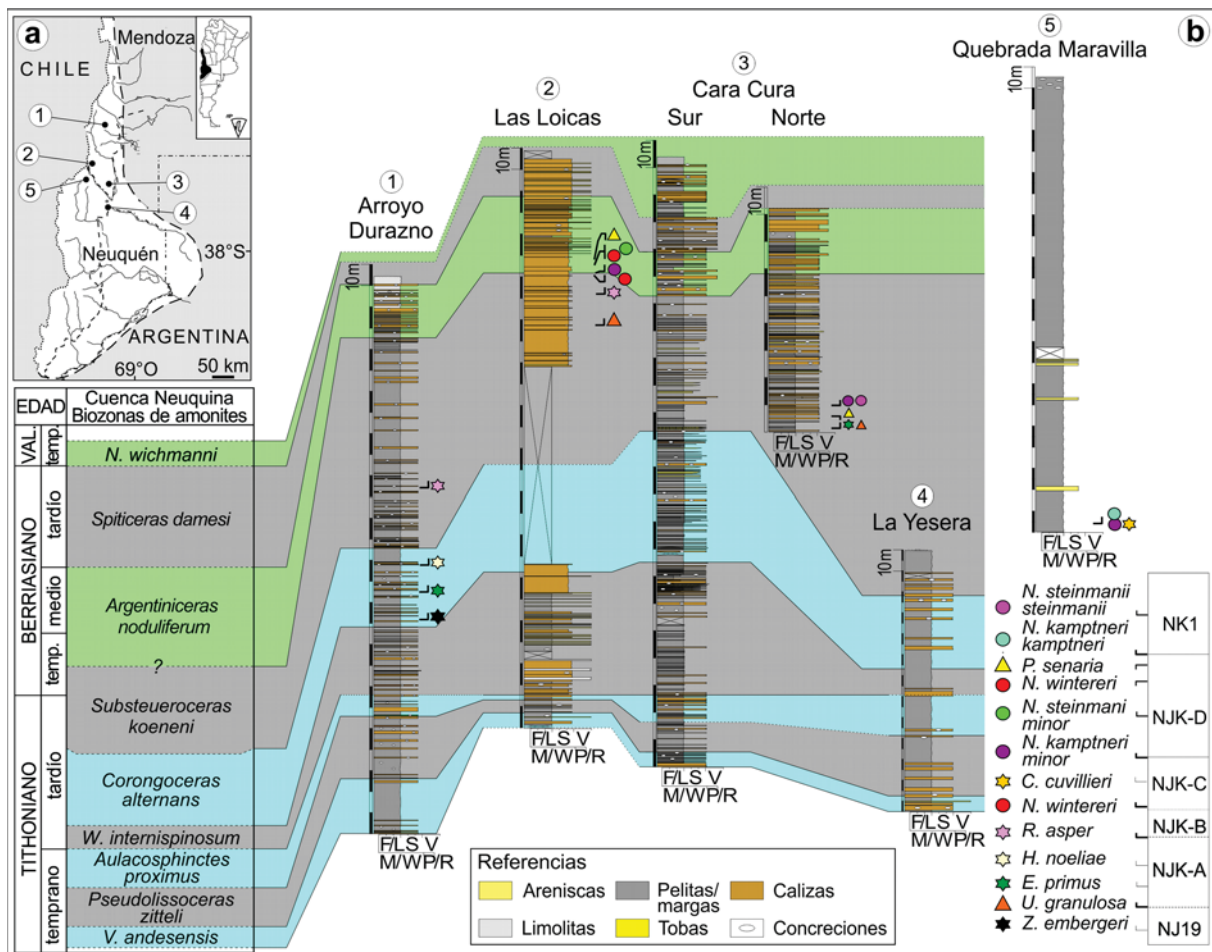
Las biozonas de amonites de *Virgatosphinctes andensis*, *Pseudolissoceras zitteli* y *Aulacosphinctes proximus* correspondientes al Tithoniano temprano han sido reconocidas en superficie en las secciones Arroyo Durazno, Las Loicas, Sierra de la Cara Cura y La Yesera. En la Quebrada Maravilla no fue posible definir biozonas basadas en amonites por su escasez y pobre preservación. En subsuelo, en el yacimiento Sierras Blancas, se registraron las tres biozonas mencionadas (*V. andensis*, *P. zitteli* y *A. proximus*), mientras que en los pozos de El Trapial sólo se registraron amonites de las biozonas de *P. zitteli* y *A. proximus*.

Cuatro bioeventos de nanofósiles calcáreos permitieron caracterizar el Tithoniano temprano en las secciones de subsuelo, los que fueron reconocidos en el sondeo ET. xp-2001 de El Trapial y en los tres sondeos de YPF. Las primeras apariciones (FOs) de *Polycostella beckmanni*, *P. senaria*, *Helicolithus noeliae* y *Eiffellithus primus* permitieron correlacionar estos niveles con las biozonas NJ20A, NJ20B, NJKA definidas para la región tethyana.

### Tithoniano tardío-Berriasiano temprano

Las biozonas de amonites de *Windhausenicerias internispinosum*, *Corongoceras alternans* y *Substeuerocebras koeneni* del Tithoniano Tardío - Berriasiano temprano fueron identificadas en secciones de superficie en Arroyo Durazno, Las Loicas, Sierra de la Cara Cura y La Yesera. Estas tres biozonas fueron reconocidas en subsuelo en el sondeo ET. xp-2001 de El Trapial y sólo la de *W. internispinosum* en el sondeo ET. xp-2006 de la misma área exploratoria. Esta última biozona también fue registrada en material de subsuelo de Sierras Blancas, mientras que las de *C. alternans* y *S. koeneni* fueron identificadas en Águila Mora.

En el subsuelo de la cuenca Neuquina se identificaron bioeventos asignados al Tithoniano Tardío y Berria-



**Figura 1.** a) Mapa de la cuenca Neuquina donde se señala la ubicación de las secciones de superficie estudiadas. b) Correlación tentativa de las secciones de superficie de la Formación Vaca Muerta sobre la base de las biozonas de amonites reconocidas y los bioeventos de nanofósiles identificados.

siano, que han permitido definir el límite Jurásico–Cretácico.

Para los sondeos A, B y C provistos por YPF se registraron las primeras apariciones de *Umbria granulosa* y *Rhagodiscus asper* y las últimas apariciones (LOs) de *Polycostella beckmanni* y *P. senaria* que permitieron definir las subzonas NJKB, NJKC, del Tithoniano Tardío y la subzona NJKD asignada al Berriasiano (Concheyro 2012a, b y c).

Estas subzonas fueron también identificadas en secciones de superficie y correlacionadas con las biozonas de amonites. Las FOs de *Z. embergeri*, *E. primus* y *H. noeliae* en la sección Arroyo Durazno fueron registradas en niveles asignados a la Biozona de *C. alternans*. Además, se reconocieron bioeventos del Tithoniano Tardío, como la FO de *R. asper* reconocida en Arroyo Durazno y Las Loicas y las FOs de *U. granulosa* y *N. wintereri*, esta última sólo en Las Loicas. Todos ellos han sido correlacionados con la Biozona de *S. koeneni*.

La FO de *N. kamptneri minor* es un bioevento asignado al Berriasiano y ha sido hallada en los perfiles de

Las Loicas y Sierra de la Cara Cura en niveles que son correlacionables con la biozona de *S. koeneni*. Este bioevento berriasiano también fue reconocido en la sección Quebrada Maravilla.

**Berriasiano temprano–Valanginiano temprano**

Las biozonas de *Argentiniceras noduliferum*, *Spiticeras damesi* y *Neocomites wichmanni* del Cretácico Temprano fueron reconocidas en las secciones Sierra de la Cara Cura, La Yesera y Arroyo Durazno. En esta última localidad, los amonites resultaron escasos y pobremente preservados en comparación con los hallados en el tramo jurásico de esa sección. Las Biozonas de *A. noduliferum* y *S. damesi* también fueron identificadas en Las Loicas. Para el subsuelo, en el sondeo Águila Mora se reconocieron algunos amonites de la biozona de *A. noduliferum* y amonites de las Biozonas de *S. damesi* y *N. wichmanni* en los sondeos ET. xp-2001 y 2002 correspondientes a El Trapial.

Para este intervalo las muestras que fueron fértiles en



nanofósiles calcáreos mostraron una baja diversidad. Sólo en Las Loicas se han registrado las LOs de *P. senaria* y *N. wintereri*, considerados bioeventos secundarios y correlacionados en esta localidad con la biozona de *A. noduliferum*.

A modo de síntesis se advierte que el Tithoniano temprano puede ser definido en subsuelo sobre la base de los amonites hallados en los pozos de El Trapial (ET. xp-2002) y Sierras Blancas, pero aún no han sido analizados los mismos niveles para ajustar mejor la edad con nanofósiles calcáreos. En el Tithoniano tardío en cambio, existe un ajustado control temporal y correlación entre las edades aportadas por los amonites y los bioeventos de nanofósiles calcáreos en las secciones de superficie (*i.e.* Arroyo Durazno y Las Loicas; Fig. 1b), y un buen control temporal dado únicamente por los nanofósiles para muestras de sondeo (*i.e.* sondeos de YPF).

### CONCLUSIONES

El análisis bioestratigráfico integrado de amonites y nanofósiles calcáreos presentado aún se encuentra en una etapa preliminar de desarrollo. No obstante, sus resultados tienen importantes implicancias tanto académicas como para la industria. Es posible realizar el ajuste del esquema biozonal andino de amonites en relación a los bioeventos de nanofósiles calcáreos de manera parcial en algunas secciones y/o sondeos y para diferentes intervalos del Tithoniano–Berriasiano y correlacionarlo con otras cuencas de la región del Tethys. Por otra parte, la correlación bioestratigráfica entre secciones de superficie y de subsuelo de la Formación Vaca Muerta, permite comprender mejor las variaciones espaciales y temporales de esta unidad a nivel regional, fundamental en las etapas exploratorias y de explotación de este estratégico recurso hidrocarburífero.

### AGRADECIMIENTOS

Se agradece a Chevron Argentina SRL, Shell Exploration and Production Company e YPF SA por permitir la publicación de los resultados presentados en esta contribución. Este trabajo contó con financiamiento parcial de los proyectos PICT 2597/2014 (VV) y PICT 1413/13 (BAU). Esta es la contribución C-127 del Instituto de Estudios Andinos.

### LISTA DE TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- Aguirre-Urreta, M.B. y Vennari, V.V. 2013a. Amonites y bioestratigrafía de la Formación Vaca Muerta en tres pozos de El Trapial (ET. xp-2001, ET. xp-2002 y ET. xp-2006) (informe inédito, Chevron Argentina), 20 p., Buenos Aires.
- Aguirre-Urreta, M.B. y Vennari, V.V. 2013b. Amonites y bioestratigrafía de la Formación Vaca Muerta en los pozos Águila Mora (Nq. AM.x-1) y Sierras Blancas (Nq.SB.x-1001) (informe inédito, SHELL CAPSA), 20 p., Buenos Aires.
- Aguirre-Urreta, M.B., Rawson, P., Concheyro, A., Bown, P. y Ottone, G. 2005. Lower Cretaceous (Berriasian–Aptian) biostratigraphy of the Neuquén Basin. En: Veiga, G.D., Spaletti, L.A., Howell, J.A. y Schwarz, E. (eds.), The Neuquén Basin, Argentina: A case Study in Sequence Stratigraphy and Basin Dynamics. Geological Society, London, Special Publication 252, p. 57-81.
- Aguirre-Urreta, B., Vennari, V.V., Lescano, M., Naipauer, M., Concheyro, A. y Ramos, V.A. 2014. Bioestratigrafía y geocronología de alta resolución de la Formación Vaca Muerta, cuenca neuquina. 9º Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Trabajos Técnicos 2: 245-268, Mendoza.
- Aguirre-Urreta, B., Lescano, M., Schmitz, M.D., Tunik, M., Concheyro, A., Rawson, P.F. y Ramos, V.A. 2015. Filling the gap: new precise Early Cretaceous radioisotopic ages from the Andes. Geological Magazine 152: 557-564.
- Bralower, T.J., Monechi, R. y Thierstein, H.R. 1989. Calcareous nannofossil zonation of the Jurassic–Cretaceous Boundary Interval and Correlation with the Geomagnetic Polarity Timescale, Marine Micropaleontology 14: 153-235.
- Concheyro, A. 2012a. Informe nanoplanctológico de muestras de subsuelo de la Formación Vaca Muerta, Pozo A (informe inédito, YPF) 58 p., Buenos Aires.
- Concheyro, A. 2012b. Informe nanoplanctológico de muestras de subsuelo de la Formación Vaca Muerta, Pozo B. (informe inédito, YPF) 42 p., Buenos Aires.
- Concheyro, A. 2012c. Informe nanoplanctológico de muestras de subsuelo de la Formación Vaca Muerta, Pozo C. (informe inédito, YPF) 43 p., Buenos Aires.
- Concheyro, A., Angelozzi, G. y Ronchi, D. 2007. Microfósiles calcáreos del límite Jurásico–Cretácico de la cuenca Neuquina. 3º Simposio Argentino del Jurásico (Mendoza). Ameghiniana (Suplemento Resúmenes) 44: 53R.
- Desjardins, P. y Aguirre, H. 2016. Capítulo 7: Sierras Blancas. En: González, G., Vallejo, M.D., Kietzmann, D., Marchal, D., Desjardins, P., González Tomassini, F., Gómez Rivarola, L. y Domínguez, R.F. (eds.), Transecta regional de la Formación Vaca Muerta: integración de sísmica, registros de pozos, coronas y afloramientos. Instituto Argentino del Petróleo y del Gas, p. 71-82, Buenos Aires.
- Kietzmann, D., Martín Chivelet, J., Palma, R., López Gómez, J., Lescano, M. y Concheyro, A., 2011. Evidence of precessional and eccentricity orbital cycles in a Tithonian source rock: the mid-outer carbonate ramp of the Vaca Muerta Formation, northern Neuquén Basin, Argentina. Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists 95: 1459-1474.
- Leanza, H.A., Sattler, F., Martínez, R.S. y Carbone, O. 2011. La Formación Vaca Muerta y equivalentes (Jurásico Tardío–Cretácico Temprano) en la Cuenca Neuquina. En: Leanza, H.A., Arregui, C., Carbone, O., Danieli, J.C. y Vallés, J.M. (eds.), Geología y Recursos Naturales de la Provincia del Neuquén: 18º Congreso Geológico Argentino, Relatorio: 113-130. Buenos Aires.
- Legarreta, L. y Gulisano, C.A. 1989. Análisis estratigráfico de la cuenca Neuquina (Triásico superior–Terciario inferior). 10º Congreso Geológico Argentino (1989), Simposio de Cuencas Sedimentarias: p. 221-244, Tucumán.
- Legarreta, L. y Uliana, M.A. 1999. El Jurásico y Cretácico de la Cordillera Principal y la Cuenca Neuquina. Facies sedimentarias. En: Caminos, R. (ed.), Geología Argentina. Servicio Nacional Minero Argentino, Anales 29: 339-416, Buenos Aires.
- Lescano, M. 2011. Bioestratigrafía, Paleocología y Palebio-



- geografía de las asociaciones de nanofósiles calcáreos y nanocónidos del Jurásico Tardío y Cretácico Temprano de la Cuenca Neuquina. Tesis Doctoral, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires (inédito), 426 p., Buenos Aires.
- Lescano, M. y Concheyro, A. 2014. Nanocónidos del Grupo Mendoza (Cretácico Inferior) en la Provincia del Neuquén, República Argentina: Taxonomía, Cronoestratigrafía e Implicancias Paleogeográficas. *Ameghiniana* 51: 466-499.
- Reboulet, S. *et al.* (18 autores). 2014. Report on the 5<sup>o</sup> International Meeting of the IUGS Lower Cretaceous Ammonite Working Group, the "Kilian Group" (Ankara). *Cretaceous Research* 50: 126-137.
- Riccardi, A.C. 2015. Remarks on the Tithonian-Berriasian ammonite biostratigraphy of west central Argentina. *Volumina Jurassica* 13: 23-52.
- Uliana, M.A. y Legarreta, L. 1993. Hydrocarbons habitat in a Triassic-to-Cretaceous sub-andean setting: Neuquén basin, Argentina. *Journal of Petroleum Geology* 16: 397-420.
- Vallejo, M.D. y González, G. 2016. Capítulo 1: Introducción. En: González, G., Vallejo, M.D., Kietzmann, D., Marchal, D., Desjardins, P., González Tomassini, F., Gómez Rivarola, L. y Domínguez, R.F. (eds.), *Transecta regional de la Formación Vaca Muerta: integración de sísmica, registros de pozos, coronas y afloramientos*. Instituto Argentino del Petróleo y del Gas, p. 1-4, Buenos Aires.
- Vallejo, M.D., González Tomassini, F., Fantín, M., Reijenstein, H., Cuevo, S y Crousse, L. 2016. Capítulo 19: El Trapial. En: González, G., Vallejo, M.D., Kietzmann, D., Marchal, D., Desjardins, P., González Tomassini, F., Gómez Rivarola, L. y Domínguez, R.F. (eds.), *Transecta regional de la Formación Vaca Muerta: integración de sísmica, registros de pozos, coronas y afloramientos*. Instituto Argentino del Petróleo y del Gas, p. 205-218, Buenos Aires.
- Vennari, V. 2016. Tithonian ammonoids (Cephalopoda, Ammonoidea) from the Vaca Muerta Formation, Neuquén Basin, West-Central Argentina. *Palaeontographica A* 306: 85-165.
- Vennari, V.V., Lescano, M., Naipauer, M., Aguirre-Urreta, B., Concheyro, A., Schaltegger, U., Armstrong, R., Pimentel, M. y Ramos, V.A. 2014. New constraints on the Jurassic-Cretaceous boundary in the High Andes using high-precision U-Pb data. *Gondwana Research* 26: 374-385.
- Weaver, C. 1931. Paleontology of the Jurassic and Cretaceous of West Central Argentina. *Memoirs of the University of Washington* 1, 496 p., Seattle.
- Zeiss, A. y Leanza, H.A. 2010. Upper Jurassic (Tithonian) ammonites from the lithographic limestones of the Zapala region, Neuquén Basin, Argentina. *Beringeria* 41: 23-74.