

# Migración primaria de hidrocarburos en *bindstones* de la Formación Vaca Muerta, Pampa de Tril, Neuquén

Natalia B. FORTUNATTI<sup>1</sup>, Nora Noemí CESARETTI<sup>1</sup> y Daniela E. CORNEJO<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Geología, Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca.  
Emails: nfortuna@uns.edu.ar, ghcesar@criba.edu.ar, daniela.cor@hotmail.com

## RESUMEN

Facies de laminitas algales (*bindstones*) expuestas en la base del perfil de la Formación Vaca Muerta en la localidad de Pampa de Tril, en cercanías de Chos Malal, provincia de Neuquén, muestran a través de estudios de petrografía y cátodoluminiscencia diferentes rasgos depositacionales y diagenéticos. Cementos tempranos de carbonato de baja luminiscencia pardo rojiza (CI), asociado a los constituyentes originales de la roca y cemento con luminiscencia levemente mayor y disposición interparticular (CII) fueron identificados; un tercer carbonato, con luminiscencia naranja (CIII), muestra sobre los constituyentes texturas isopáquicas de relleno interparticular y cementa fracturas naturales; el más tardío, con luminiscencia amarilla (CIV), reemplaza a carbonato de relleno de fracturas. La migración primaria a través de planos de laminación original de la laminita algal queda corroborada por la impregnación de bitumen de los mismos. Un evento posterior de migración de hidrocarburos queda probado por el desplazamiento lateral aparente por disolución de fracturas que cortan la laminación biogénica del *bindstone*. La expulsión de hidrocarburos líquidos para el *bindstone* basal de la Formación Vaca Muerta en Pampa de Tril constituye un proceso multiepisódico registrado por relaciones de corte entre los planos de migración primaria del bitumen y las fracturas naturales.

**Palabras clave:** *fábrica sedimentaria, cátodoluminiscencia, migración primaria, fracturación, paragénesis.*

## ABSTRACT

*Hydrocarbon primary migration on bindstones of Vaca Muerta Formation, Pampa de Tril, Neuquén*

Laminated algal facies (*bindstones*) of Vaca Muerta Formation basal section exposed at Pampa de Tril area, near Chos Malal city (Neuquén province), show through petrography and cathodoluminescence studies different depositional and diagenetic features. Early carbonate cements with reddish brown low luminescence (CI) in original constituents of the rock and slightly higher luminescence with interparticle occurrence (CII); a third carbonate cement with orange luminescence (CIII) shows isopach and interparticular distribution and seals natural fractures; the latest cement (CIV), with yellow luminescence, locally replace carbonate fractures cements. Primary migration through original boundaries of algal laminites is corroborated by bitumen impregnation. A late primary migration event is proved by lateral apparent displacement of natural fractures cutting *bindstone* biogenic fabric. Oil expulsion for basal section in Vaca Muerta Formation at Pampa de Tril consists of a multiepisodic event that was registered by cut relationships between primary migration planes and natural fractures.

**Keywords:** *Sedimentary fabric, cathodoluminescence, primary migration, fractures, paragénesis.*

## INTRODUCCIÓN

La Formación Vaca Muerta (Jurásico Superior-Cretácico Inferior) ha sido estudiada en los últimos años por Chebli *et al.* (2011), entre otros, desde un punto de vista de reservorio no convencional. Los

mencionados autores estiman como importante el potencial de las reservas en esta unidad basados en la cantidad, la calidad y la madurez de la materia orgánica. Esta formación se desarrolla en gran parte de la Cuenca Neuquina constituida por arcillitas y/o margas como litologías domi-

nantes, con espesores regulares (250 m promedio), hallándose en subsuelo aproximadamente a 2500-3000 m de profundidad en sectores de centro de cuenca. Los valores de COT (carbono orgánico total) varían entre 3 y 8% con picos de 10 a hasta 12% (Villar y Laffite 1998); los

50 m basales contienen la mayor concentración de materia orgánica (Uliana *et al.* 2014). Los querógenos que contiene esta formación son de tipo I/II (Legarreta *et al.* 2005) y la madurez orgánica medida en reflectancia de vitrinita ( $R_o$ ) es de 0,6% a 2,2%, con zonas bien definidas en el sentido este-oeste y un estadio de sobremaduración hacia el sector occidental ( $R_o > 2$ ) (Chebli *et al.* 2011). Recursos de tipo *shale-oil* se han sumado a los de shale-gas sobre la base del esfuerzo exploratorio de los últimos años (Chebli *et al.* 2011). Sin embargo, el conocimiento de este tipo de reservorio a nivel mundial tiene como impronta relevante la litología, la cantidad y calidad de la materia orgánica y fracturación natural de la roca (Slatt *et al.* 2012, Askenazi *et al.* 2013, entre otros) siendo necesario para la Formación Vaca Muerta ahondar en estudios de detalle aplicables a esfuerzos exploratorios y productivos (García *et al.* 2013). Los recientes descubrimientos de estos recursos globales impulsan a profundizar el entendimiento de su estratigrafía, correlaciones locales y regionales, origen, tipo de fluido y patrones de migración, para dar lugar finalmente a la identificación del mejor nivel a tratar artificialmente para su explotación económica (Slatt *et al.* 2012).

En esta presentación se describen y analizan las evidencias de migración primaria de hidrocarburos líquidos vinculadas a distintos procesos de cementación para la base de la Formación Vaca Muerta. Se realiza un nuevo aporte sobre los sucesivos eventos sedimentarios, diagenéticos y tectónicos que registraron la expulsión de hidrocarburos de una litofacies específica dentro del actual contexto de la unidad como reservorio no convencional. Se estudian muestras de la Formación Vaca Muerta localizadas en la base del perfil aflorante en Pampa de Tril, correspondientes a un estrato de 1 m de espesor compuesto por rocas bioconstruidas que presentan laminación fina de menos de 5 mm de espesor, coloración oscura y olor fétido, el cual cubre en contacto neto a la Formación Tordillo (Kimmeridgiano-Tithoniano inferior). La fracturación presente en el nivel de estudio está representada por diaclasas subverticales (dirección de buzamiento y ángulo de buzamiento promedio 200/85), de 1-2 mm de espesor

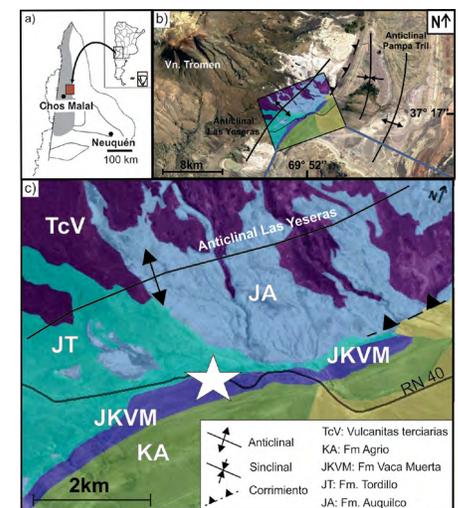
máximo, selladas por cemento mineral (calcita), cuyo espaciamiento y densidad se presenta asociado al desplazamiento de orden métrico de una estructura tectónica compresiva menor.

## MARCO GEOLÓGICO

La Formación Vaca Muerta (Tithoniano tardío-Valanginiano temprano), definida por Weaver (1931), posee amplia extensión areal tanto en subsuelo como en afloramiento (Leanza *et al.* 2011). Registra una importante transgresión marina ocurrida durante el Tithoniano temprano, donde la particular paleo-geotectónica de la cuenca proporcionó condiciones favorables para la formación de una de las rocas generadoras con mayor potencial en el mundo en relación a cantidad, calidad y madurez de la materia orgánica.

El perfil estudiado de la Formación Vaca Muerta se encuentra expuesto sobre la ruta Nacional 40 que une la localidad de Chos Malal con Buta Ranquil, en el flanco occidental del Anticlinal de Pampa de Tril ( $37^{\circ}18'3.21''$  Sur -  $69^{\circ}53'1.83''$  Oeste), cuya génesis se vincula a dos grandes estructuras de basamento asociadas a corrimientos profundos: el Anticlinal de la Cordillera del Viento al oeste y el Macizo del Tromen al este, en la Fosa de Chos Malal (Cruz *et al.* 1996) (Fig. 1). Los mismos autores indican valores de COT de 0,76 a 3,72%, evidencias de un querógeno de tipo I amorfo, de origen marino-algal y un  $R_o$  promedio de 1,08 indicando que la unidad se encuentra en ventana de generación de hidrocarburo líquido y gas húmedo (Tissot y Welte 1984). En la localidad de estudio, la Formación Vaca Muerta está compuesta mayormente por intercalaciones de fangolitas oscuras a negras con participación de calizas fosilíferas. Las facies dinámicas están integradas por mudstone masivas o finamente laminadas con desarrollo de fisilidad, *wackestone* y *packstone* (Dunham 1962), en ocasiones *floatstone* (Embry y Klovan 1971); las bioconstruidas están constituidas por *boundstone* (Dunham 1962), definiéndose en el sector basal un *bindstone* (Embry y Klovan 1971, Fig. 2a) con morfología cómica y delicadas láminas irregulares subparalelas (menor a 5 mm, Fig. 2b-c).

Kietzmann *et al.* (2014, 2016) reconoce y describe esta particular facies para la localidad de estudio como microbialitas planares formando parte de una asociación



**Figura 1.** a) Ubicación geográfica de la Cuenca Neuquina en Argentina y la localidad de estudio; b-c) Geología y detalle de Pampa de Tril.

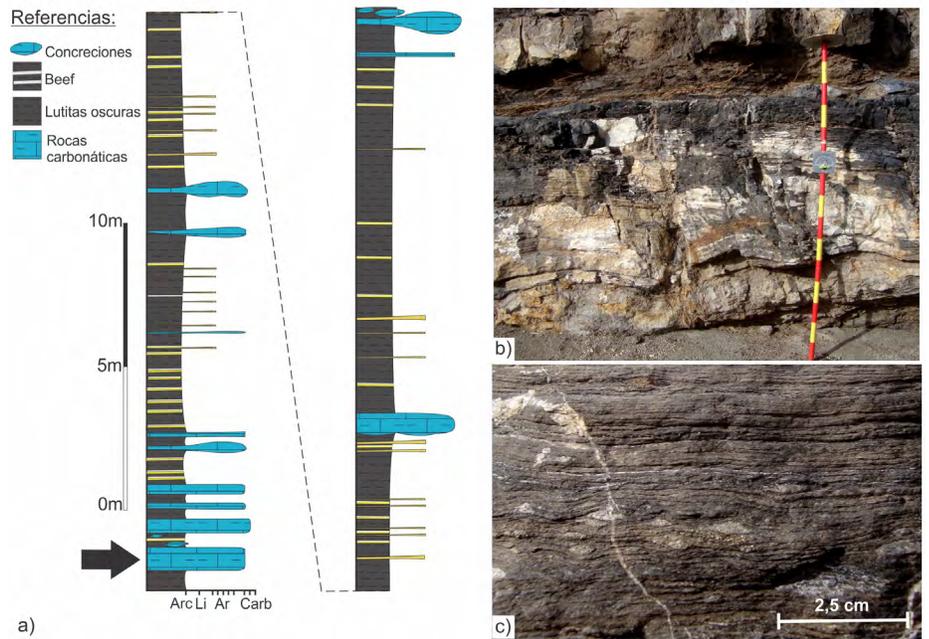
de facies dominada por lutitas y margas laminadas, con elevado contenido de materia orgánica (4-5% COT) y por lo tanto, uno de los niveles más importantes como generador de hidrocarburos. Los autores interpretan a la asociación de facies que involucra a las microbialitas como depositada debajo del nivel de ola de tormenta en un marco de rampa externa distal, con condiciones de baja oxigenación dentro de la cuenca.

Banco *et al.* (2014) caracterizan y describen microfacies para el perfil de Pampa de Tril a partir de su mineralogía, geoquímica orgánica, petrografía y respuesta al ensayo con microscopía de fluorescencia por luz incidente. Dentro de las microfacies, definen un *boundstone* (Dunham 1962) relacionándolo a la construcción *in situ* de un bioherma por parte de diferentes organismos. El estudio de fluorescencia reveló la existencia de componentes orgánicos en las inclusiones fluidas de los carbonatos (esparita y calcita) y el estado gaseoso del fluido. Se destacó la fracturación como vía favorable para la migración del hidrocarburo.

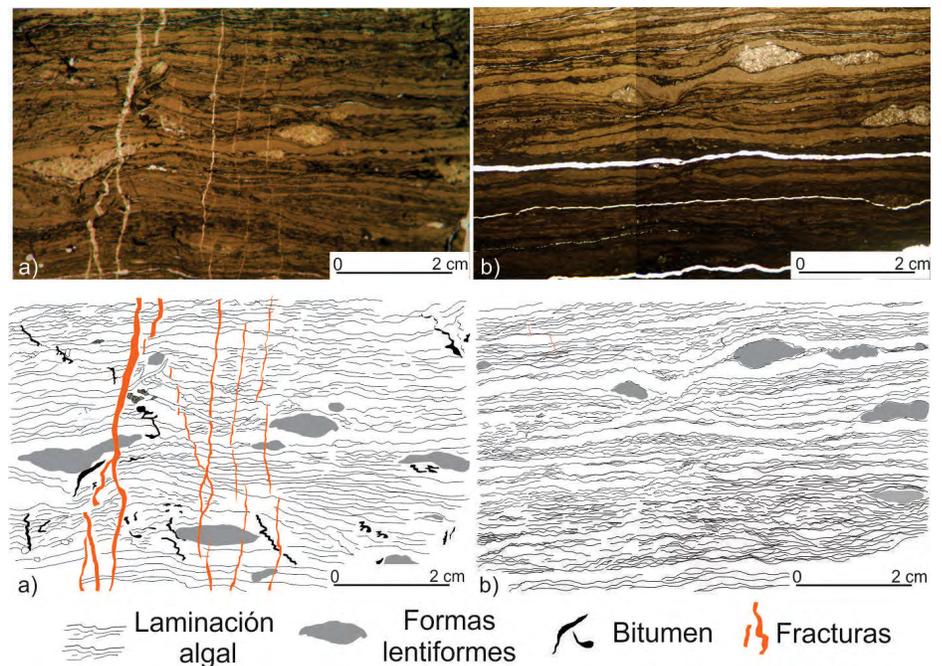
Un rasgo notable es la presencia de *beefs* (*bedding-parallel veins of fibrous calcite*, Rodríguez *et al.* 2009). Se trata de venillas paralelas a la laminación/estratificación

rellenas de calcita fibrosa con textura antitaxial (Ramsay y Huber 1983) y espesor variable, entre 1 mm y 5 cm como máximo. Rodríguez *et al.* (2009) caracterizan la madurez de la Formación Vaca Muerta a través del estudio de *beefs* y asignan su origen a dos pulsos diferentes para establecer su origen: el primero formador de la zona interna y el segundo, desarrollado entre el anterior y la roca de caja. Su importancia radica en la asociación de ambos pulsos y su simultaneidad con la generación de hidrocarburos líquidos, definiendo una profundidad mínima de soterramiento de 1500 m donde tanto el fluido orgánico como la precipitación de la venilla comienzan a formarse juntos. Rodríguez *et al.* (2009) interpretan que la sobrepresión de fluidos asociada a la generación temprana de hidrocarburos sería el disparador del primer pulso cementante de calcita en los *beef*, mientras que la compresión tectónica, favorecida por los planos de debilidad previos entre el *beef* (más resistente) y las lutitas, se vincularía con el segundo evento cementante.

Estudios diagenéticos, que evalúan procesos de cementación vinculados a la presencia de hidrocarburos, fueron presentados por Cesaretti *et al.* (2016) con un enfoque desde la fósildiagenesis como herramienta para evaluar el timing de expulsión de los hidrocarburos. Fortunatti *et al.* (2016) analizaron la vinculación entre las microfacies propuestas por Banco *et al.* (2016) y la deformación e infirieron un esquema temporal de eventos para la fracturación natural y los distintos fluidos diagenéticos asociados a las mismas, con énfasis en los fluidos orgánicos. Recientemente, nuevos aportes fueron realizados por de Barrio *et al.* (2017), quienes describen la petrografía y fracturas naturales para la sección basal de la Formación Vaca Muerta en muestras de subsuelo (testigos coronas) para el noroeste del engolfamiento neuquino. Describen niveles microbiales y *beefs* y concluyen que la sección basal de la unidad posee buenas características como reservorio tipo *shale-gas*. Gonzalez Tomassini *et al.* (2017) destacan la importancia de caracterizar la heterogeneidad de la Formación Vaca Muerta a fin de conocer su impacto en la estratigrafía mecánica de la unidad y su aplicabilidad en la estimulación de po-



**Figura 2.** a) Perfil sedimentológico realizado para la Formación Vaca Muerta en la localidad de Pampa de Tril, indicando con flecha el estrato objeto de estudio; b) Geometría del estrato que contiene el *bindstone*; c) Fina laminación algal típica de rocas bioconstruidas.



**Figura 3.** Imágenes bajo Lupa Leica MZ95 de dos secciones representativas de la fábrica del *bindstone*. a) VMGI; b) VMGII.

zos productores. Martínez *et al.* (2017) caracterizan los 150 m basales de la unidad para la zona de Bajo de Añelo y definen intervalos de interés exploratorio en función de sus características litológicas y su mineralogía.

## METODOLOGÍA

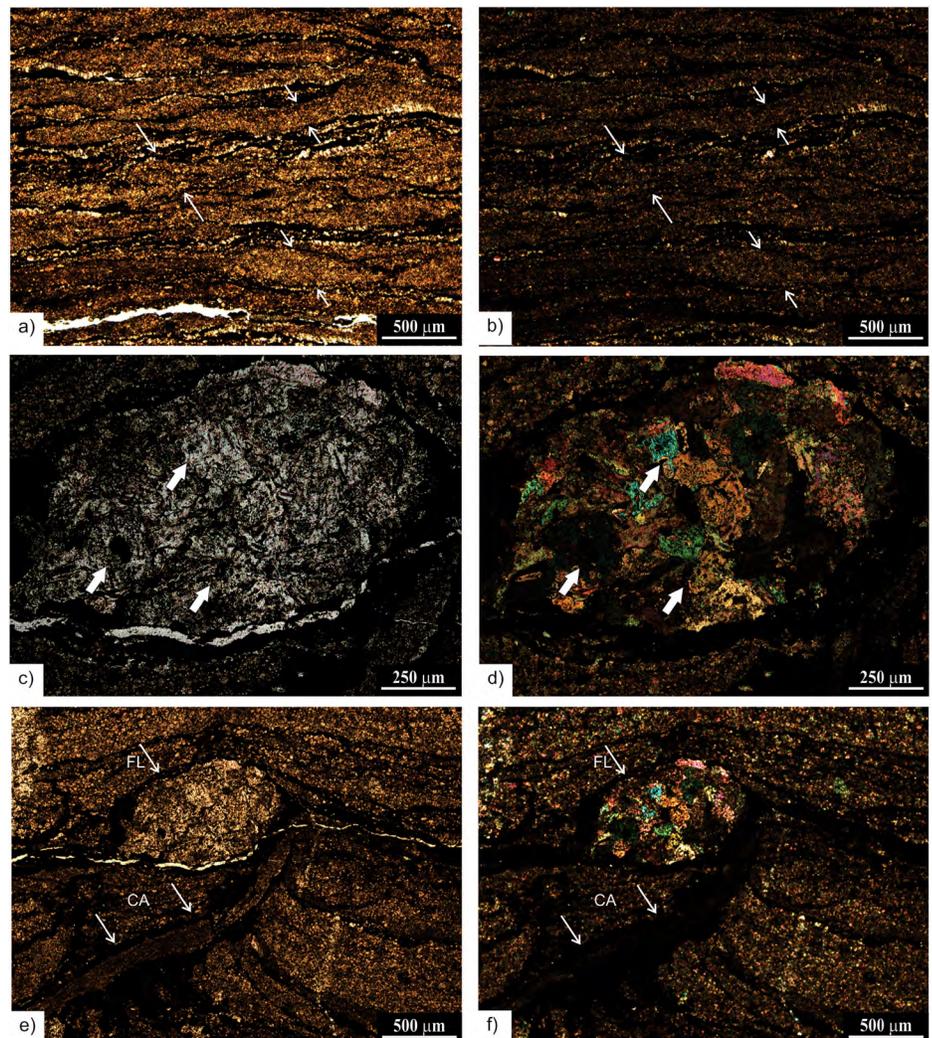
El material de estudio consistió en muestras de mano y secciones delgadas pulidas, descubiertas, confeccionadas en el Laboratorio de Petrotomía del INGENIO.

SUR- Departamento de GEOLOGIA - UNS, preparados que permiten realizar estudios petrográficos tradicionales en luz transmitida y estudios por luz incidente.

Los estudios por incidencia fueron realizados mediante catodoluminiscencia; el análisis consiste en la incidencia de un haz de electrones que excita la muestra, la cual emite respuesta en función de la presencia de determinados elementos químicos constituyentes del mineral o presentes en éste como impurezas. Los carbonatos son especialmente sensibles a esta estimulación; si los mismos contienen Mn, la respuesta del mismo se ve incrementada, denominándose al Mn activador, en tanto que, si contienen Fe, la respuesta se ve deprimida, denominándolo al Fe supresor del fenómeno (Marshall y Mariano 1988). Estos estudios se llevaron adelante en el Laboratorio de Luminiscencia del Departamento de Geología-UNS- Bahía Blanca (Microscopio Nikon Eclipse 50i Pol de polarización y epifluorescencia con platina de Cátodo-luminiscencia Mk5).

El análisis de muestras de mano se realizó en Lupa Leica MZ95 en el Laboratorio de Geología de Yacimientos del Departamento de Geología- UNS.

Análisis de carbono orgánico sobre roca total (COT), a fin de determinar cantidad de materia orgánica presente en la muestra, fueron realizados en el Laboratorio de LABSPA-CERZOS- CONICET-UNS – Bahía Blanca.



**Figura 4.** a-b) Fábrica de la muestra VMGI, flechas indicando laminación primaria y coalescencia (LT: Luz transmitida, sin y con nicol respectivamente); c-d) Cuerpos lenticulares de material alóctono, flechas indicando bioclastos (LT sin y con nicol); e-f) Disturbación asociada a cuerpo algáceo discordante. Referencias: CA: Cuerpo algáceo, FL: Forma lenticular (LT sin y con nicol).

## RESULTADOS

La roca estudiada se define como un *bindstone* (Embry y Klovan 1971) en la cual se determinó un 4% de COT. La mineralogía está representada por micrita (<5 μm) y, en menor proporción, micrita reemplazada por microesparita (5 μm - 15 μm). Se registran diferencias en la fábrica de la roca respecto al espesor y la geometría de las láminas que conforman la construcción biológica. En la figura 3a-b se presentan dos secciones representativas de los rasgos morfológicos más notables denominadas VMGI y VMGII.

### Petrografía

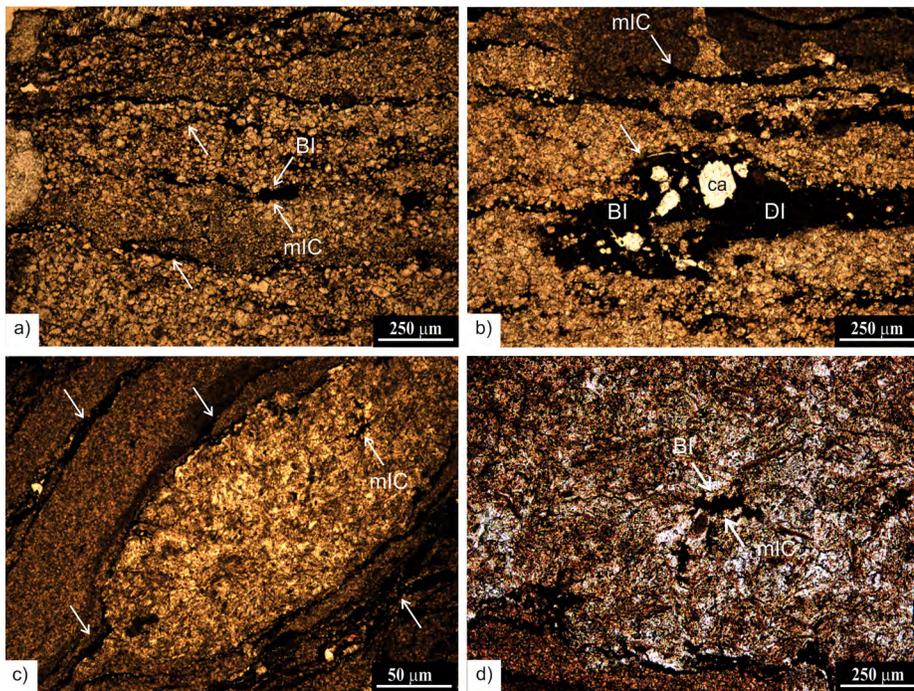
VMGI está formada por laminitas de espesor variable menor a 3 mm, entre 375 a

500 μm y hasta 750/875 μm; existen algunas muy delgadas, de 125 μm, presentes de manera restringida que muestran coalescencia (Fig. 4a-b). La fábrica laminar se encuentra localmente disturbada por arreglos lentiformes de material alóctono (bioclastos y espículas de esponjas), intensamente recrystalizados a calcita, que constituyen para esta muestra un rasgo común (Fig. 4c-d). Un cuerpo algáceo con formas elongadas, discordante respecto a las laminitas, disturba localmente la laminación con una estructura similar a las de tipo dique clásico (Fig. 4e-f).

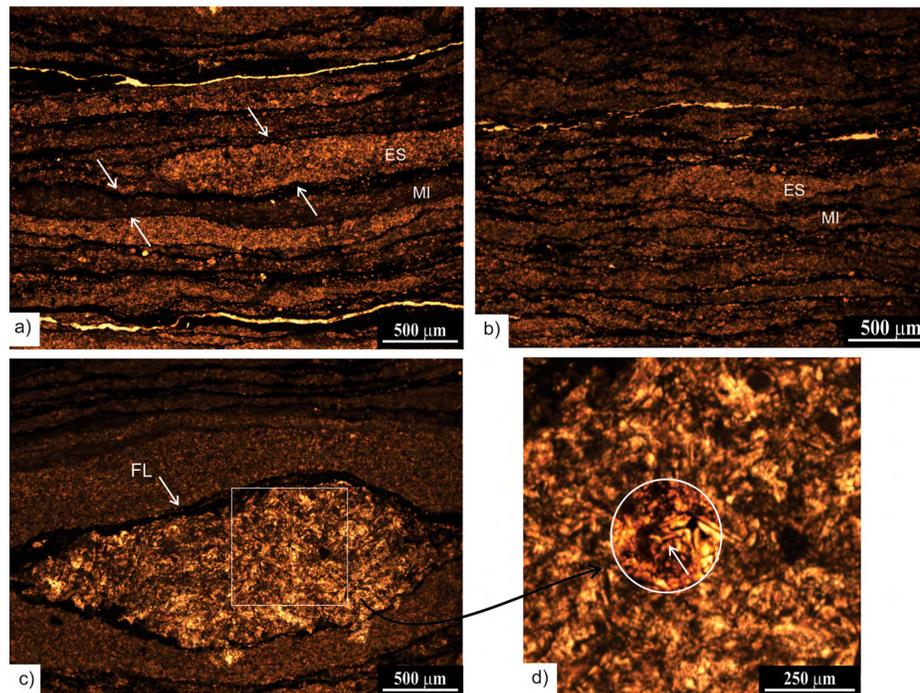
La muestra posee importante cantidad de bitumen que se encuentra asociado a los planos de laminación primaria de la bioconstrucción y se lo reconoce en las zo-

nas de coalescencia de las láminas más delgadas. El bitumen adicionalmente se dispone en el interior de microniveles recrystalizados a microesparita en zonas de disolución (porosidad intercrystalina, Fig. 5a-b) y en las formas lenticulares, aislado y sin conectividad con los planos de migración asociados a la fábrica del *bindstone* (Fig. 5c-d).

VMGII presenta una fábrica laminar más homogénea, con espesores uniformes y escasos cuerpos lenticulares. Los espesores de las laminitas varían entre 100 y 125 μm. La mineralogía corresponde en su mayoría a microesparita, especialmente en las láminas más delgadas o que muestran coalescencia. Esparita se presenta de manera esporádica en las láminas



**Figura 5.** a) Fábrica del *bindstone* en VMGI favoreciendo migración primaria de bitumen (BI) y desarrollo de porosidad intercrystalina (mIC) (LT sin nicol); b) Disolución (DI) y porosidad intercrystalina (mIC) con presencia de calcita autigénica (ca) y Bitumen (BI) (LT sin nicol); c-d) Porosidad intercrystalina (mIC) en límites de los cuerpos lenticulares, sin conectividad con los planos de migración primaria de Bitumen (BI) asociados a la fábrica de la roca (LT sin nicol).



**Figura 6.** a-b) Fábrica de la muestra VMGII, flechas indicando laminación primaria (MI: micrita, ES: esparita) (LT sin nicol); c) Forma lenticular (FL) de material alóctono (LT sin nicol); d) Espícula indicada por la flecha formando parte de la forma lenticular (LT sin nicol).

de mayor espesor, desde 125 a 750  $\mu\text{m}$  aproximadamente (Fig. 6a-b). Las formas lenticulares son menos abundantes e importantes en relación a VMGI; predominan en la zona media de la muestra y están constituidas por espículas y calcita recristalizada (Fig. 6d-f).

Bitumen se presenta como impregnación en los planos primarios de la bioconstrucción, al igual que en VMGI. En aquellos sectores de la muestra donde las laminitas son muy delgadas la coalescencia de las mismas es común, junto con la presencia de microcanales dispuestos en los límites de la laminación. Cristales diagenéticos de cuarzo se presentan asociados a la migración de los fluidos (< 5%) (Fig. 7a-b). Zonas de disolución que alojan bitumen (porosidad intercrystalina) se disponen aisladas, sin conexión con los planos de migración principales, preferencialmente dentro de las láminas recristalizadas a esparita y dentro de las formas lenticulares (Fig. 7c-d).

## Fracturación

Se encuentran presentes tres tipos de planos de fractura discordantes o no respecto a la fábrica laminar, identificables a partir de sus características y escala: 1) microfracturación discordante en alto ángulo cementada por bitumen, 2) diaclasamiento subvertical identificable a escala de afloramiento y microfracturación asociada y 3) *beefs*.

Las microfracturas discordantes orientadas en alto ángulo respecto a la laminación (subperpendiculares) cementadas por bitumen, conectan los distintos planos de migración asociados a los límites de las laminitas. Este rasgo se destaca en VMI y está pobremente representado o ausente en VMII (Fig. 8a-d).

La microfracturación discordante, asociada al diaclasamiento relevado en el afloramiento, se presenta a escala microscópica en dos jerarquías: con espesor milimétrico y al menos dos generaciones de cristales de calcita constituyendo rellenos con textura sintaxial (Ramsay y Huber 1983) (Fig. 8a, c-d) o con espesor micrométrico (cerca de los 20  $\mu\text{m}$ ) y textura de relleno de calcita tipo *crack-seal* (Ramsay 1980) (Fig. 8e-f). Existe cercanía y similitud en la orientación de las fracturas discordantes de bitumen y las venillas subverticales

de mayor desarrollo rellenas con cemento mineral (Fig. 8a-d).

Las microfrazas cementadas por calcita presentan tanto en VMGI como en VMGII desplazamientos laterales menores (*offsets*) en la intersección con el plano de laminación biogénica original impregnado con bitumen (Fig. 9a-b).

La presencia de *microbeefs* (Rodríguez *et al.* 2012) especialmente en VMGI, constituye un rasgo común. Se disponen asociadas a los planos primarios de la bioconstrucción con continuidad o coalescencia variables (Fig. 10a-b-c). Se presentan con textura de relleno de calcita fibrosa de tipo antitaxial (Ramsay y Huber 1983) con el eje cristalino mayor ubicado perpendicular a la laminación primaria; su línea media está cementada por bitumen. Localmente, los cristales de calcita pueden registrar desplazamiento de cizalla (Fig. 10d-e).

### Cátodoluminiscencia

Analizadas por catodoluminiscencia, las muestras exhibieron diferentes respuestas ante la irradiación con el haz de electrones. Fueron reconocidos cuatro carbonatos (I, II, III y IV), con respuesta creciente a la irradiación o luminiscencia. El carbonato I corresponde a los constituyentes originales de la roca, sub-redondeados a husiformes (peloides), generados durante el momento de su sedimentación y posee luminiscencia tenue parda rojiza. El carbonato II forma parte de la fábrica de la roca como cemento interparticular entre los constituyentes originales de las láminas y muestra luminiscencia parda rojiza levemente mayor que los peloides (Fig. 11a-c). El carbonato III presenta luminiscencia mayor que el I y el II, en tonalidades anaranjadas rojizas intensas, encontrándose tanto en la roca como en las fracturas. Dentro de las láminas, se encuentra como cemento interparticular en aquellos sectores donde la cementación de carbonato II no está presente, disminuyendo la porosidad interparticular (Fig. 11d) o como cemento isopáquico alrededor de los constituyentes (Fig. 11e). Las formas lenticulares muestran al carbonato I y II formando parte de los componentes originales de la roca (bioclastos y espículas) y al carbonato III como cemento interparticular de las frac-

turas, con cristales ehedrales en venillas discordantes respecto a la laminación original de la roca (Fig. 13a-c) o cristales fibrosos en el relleno cristalino de las estructuras tipo *beef* (Fig. 13a). Por último, un carbonato IV de mayor luminiscencia, con tonalidad anaranjada intensa, ocurre de manera subordinada en el interior del carbonato III en fracturas y microfrazas discordantes a la fábrica de la roca, a manera de reemplazo (Fig. 13a-c). El carbonato IV se ha observado presente de manera muy restringida en los *microbeefs* (Fig. 13a).

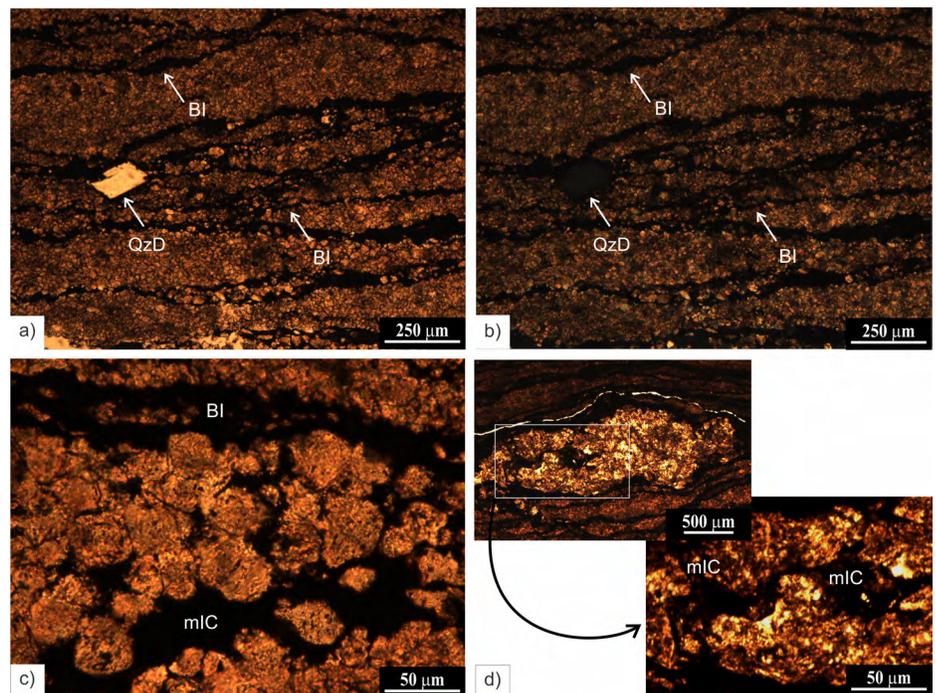
Las venillas subverticales presentan desplazamientos laterales u *offsets* en la intersección con los planos de laminación primaria saturados de Bitumen (Fig. 14a-c). La relación de corte entre la fracturación discordante subperpendicular y los *microbeefs* no es clara en el análisis de catodoluminiscencia.

## DISCUSION

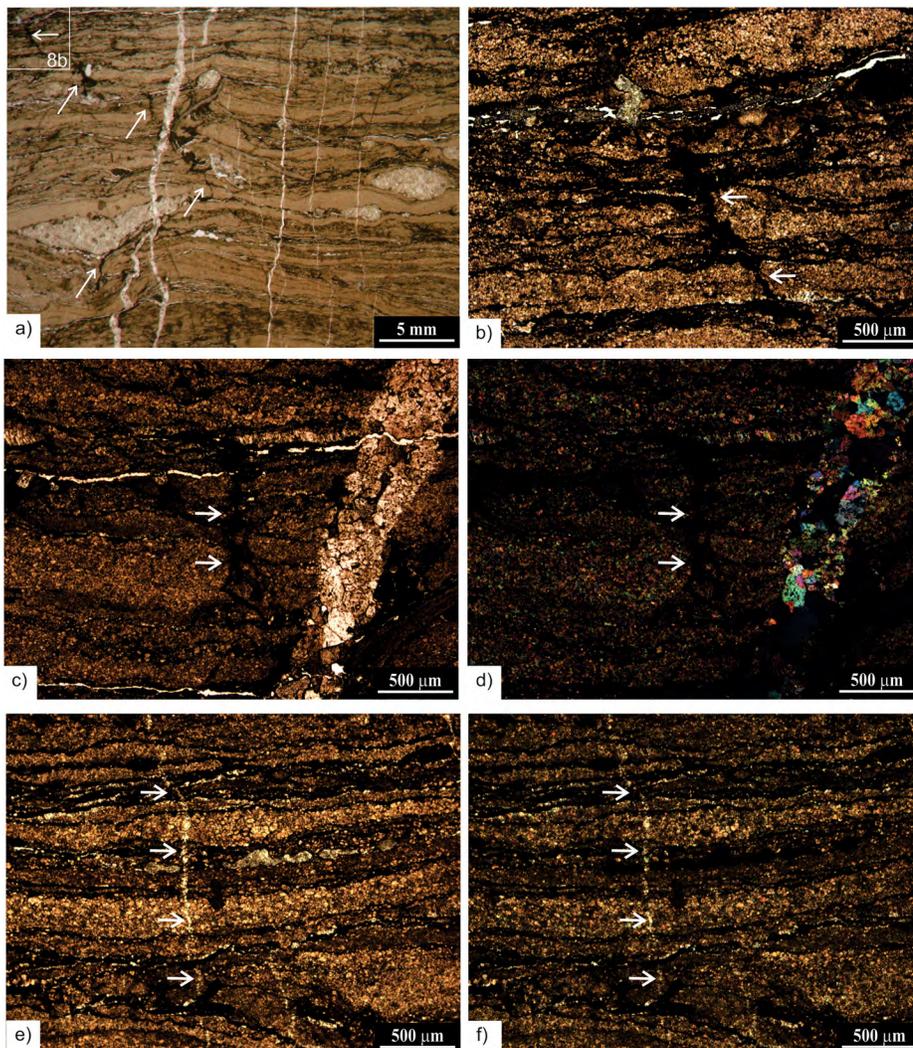
Se interpretan condiciones de interior de cuenca en el sector de Pampa de Tril con un umbral ubicado al oeste, acorde a la

clasificación de cuencas desde el punto de vista oleogénico establecida por Demaison y Moore (1980). Para el momento de la depositación de la Formación Vaca Muerta, la cuenca estaría actuando en condiciones de balance positivo dado por la inundación de la misma. Esta inundación habría propiciado las condiciones adecuadas para la formación de un cuerpo de roca constituido por laminillas algales, las cuales habrían sido cubiertas y sepultadas en un fondo anóxico continuando el balance positivo. Dichas condiciones habrían favorecido la preservación de la materia orgánica, tal como es interpretado por Kietzmann *et al.* (2016); esto podría explicar los mayores tenores de materia orgánica (4-5% COT) presentes en esta facies y su importancia como generadora de hidrocarburos.

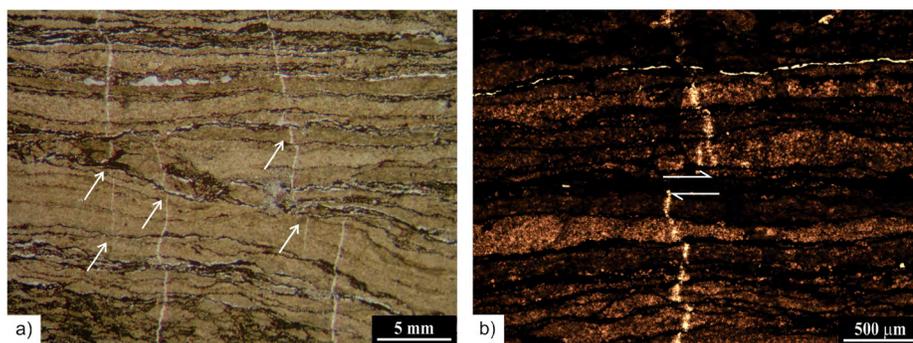
La materia orgánica presente en el *bindstone* es de tipo algal y es interpretada como un querógeno de tipo I (alginita); su morfología permite asimilarla a algas de tipo Tasmanites de acuerdo a la clasificación de Tissot y Welte (1984). Esto es coincidente con las interpretaciones de Kietzmann *et al.* (2016) quienes interpretan algas marinas para este sector del per-



**Figura 7.** a-b) Fábrica del *bindstone* en VMGII favoreciendo migración primaria de bitumen (BI) y desarrollo de porosidad intercrystalina con presencia de cuarzo diagenético en zonas de disolución (QzD) (LT sin nicol y con nicol respectivamente); c) Detalle de la porosidad intercrystalina (mIC) y bitumen (BI) en plano de migración (LT sin nicol); d) Porosidad intercrystalina (mIC) aislada en el centro de un cuerpo lenticular (LT sin nicol).



**Figura 8.** a) Fracturación representativa del *bindstone* (VMGI): se observa fracturación tectónica cementada por calcita y fracturación hidráulica cementada por bitumen indicada por flechas (LT sin nicol); b) Detalle de la microfractura discordante a la fábrica cementada por bitumen (LT sin nicol); c-d) Fracturación tectónica asociada al diaclasamiento de la roca con relleno de textura tipo sintaxial de calcita, flechas indicando fractura cementada con bitumen de orientación similar (LT sin y con nicol respectivamente); e-f) Fractura perpendicular a la laminación con textura de relleno de tipo *crack-seal* (LT sin y con nicol respectivamente).



**Figura 9.** a-b) Desplazamiento lateral aparente (*offset*) registrado en las fracturas respecto a los planos primarios de la fábrica del *bindstone* (LT sin nicol).

fil analizado. El hecho de que la materia orgánica esté constituida por un querógeno de tipo I es alentador, dado que es el ideal para la generación de hidrocarburos líquidos si alcanza su punto de madurez óptimo o la generación de hidrocarburos gaseosos si su madurez es muy avanzada, acorde a lo establecido por Tissot y Welte (1984).

El hallazgo de bitumen en los planos de la laminación algal demuestra que hubo maduración y generación de hidrocarburos y que comenzó el proceso de migración dentro de la roca generadora (migración primaria de acuerdo a Levorsen 1973), acorde a los planos de discontinuidad naturales dados por la construcción biogénica.

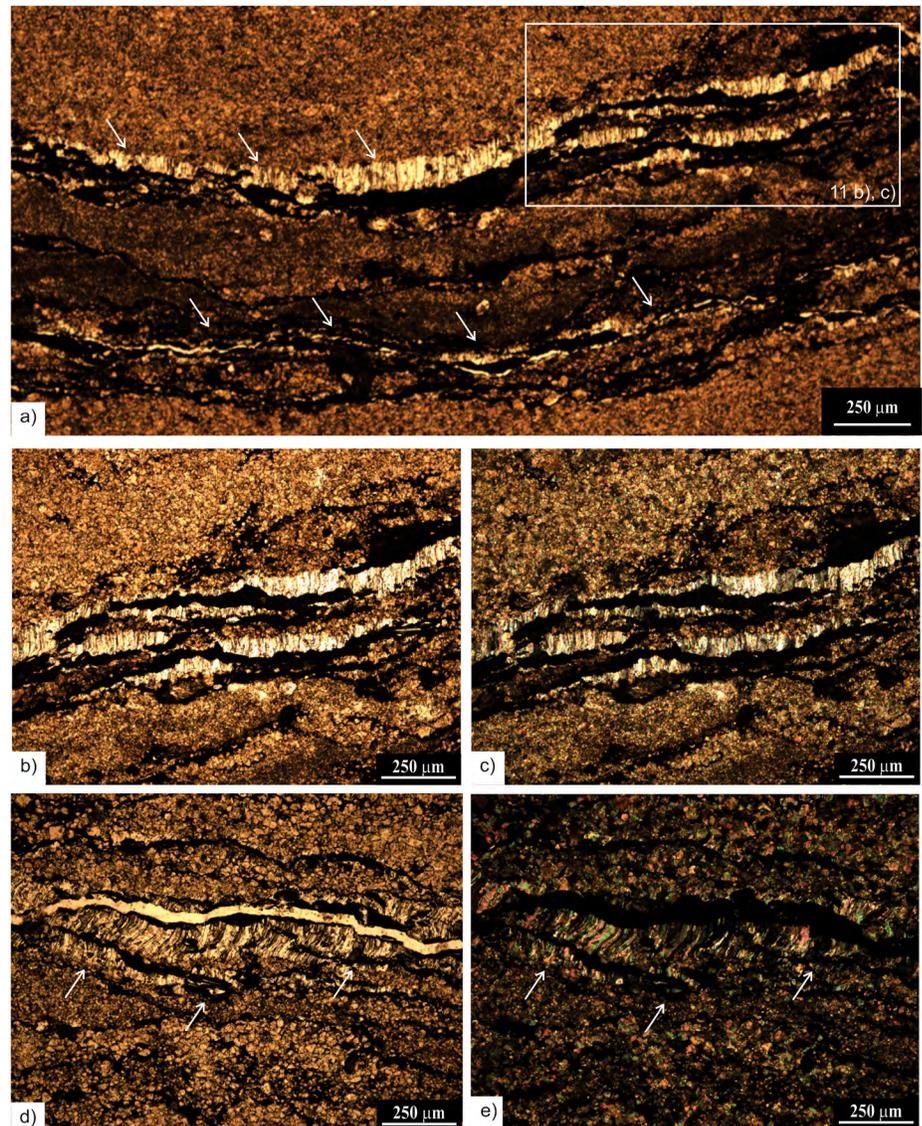
Durante la evolución geológica de este particular tipo de roca, los procesos tectónicos habrían sido los responsables de la deformación dúctil y frágil para el sector del perfil que las contiene, los mismos habrían generado plegamiento y fracturación asociada. Las fracturas provocadas se constituirían en vías de migración adicionales a las dadas por los rasgos depositacionales, los planos preferenciales de laminación algácea. Las vías de migración vinculadas a las fracturas fueron cementadas parcialmente y la petrografía de los carbonatos cementantes permitió construir una paragénesis para los niveles estudiados. Esta paragénesis de carbonatos, esclarecida mediante estudios de catodoluminiscencia, muestra sucesivos episodios de cementación carbonática vinculados con la historia diagenética estructural de la formación en este sector particular.

Las laminitas individuales formarían la bioconstrucción conteniendo peloides (carbonato I) interrumpida localmente por lentes de material alóctono proveniente de los organismos que habitan la columna de agua circundante, entre ellos, esponjas (Fig. 15a). La fina laminación es acentuada por el cemento carbonático interparticular (carbonato II) que sella la porosidad selectiva inicial (Choquette y Pray 1970, Fig. 15b). En esta instancia la roca alcanza un soterramiento en ámbito de diagénesis freática dada la existencia de cemento isopáquico (Fig. 15c) (Longman 1980) dispuesto alrededor de sus constituyentes. La primera fase de expulsión de hidro-

carburo líquido (migración primaria) se habría producido en la superficie de los planos de las laminillas algales. La impregnación de hidrocarburo como relicto en estos sectores y en la coalescencia de las mismas a través de porosidad selectiva fenestral, definida por la fábrica deposicional y disolución en los límites de las laminillas por diagénesis (Choquette y Pray 1970) corrobora esta hipótesis. La presencia de material alóctono constituye una barrera para la migración primaria descrita, mientras que la recrystalización de micrita a pseudoesparita y a esparita proporciona porosidad intercrystalina adicional al sistema preestablecido que favorece la misma. La porosidad resultante se da de manera reducida y aislada, restringida sólo a las láminas que presentan cemento interparticular disuelto (Fig. 15c). El posterior tectonismo sufrido por la roca habría provocado fracturación y sellado por carbonato III, con evidencias de corte respecto al primer estadio de migración primaria. Este evento podría haber favorecido la migración acorde a planos discordantes de bitumen respecto a la laminación algácea a través de fracturación hidráulica, como mecanismo accesorio (Fig. 15d).

Un nuevo pulso de expulsión en los planos de laminación queda documentado a través del desplazamiento lateral aparente (*offset*) de las venillas (Fig. 15e). La superficie de migración de fluidos orgánicos (entre otros) constituye un plano de disolución produciendo la pérdida progresiva del carbonato III (Pettijhon 1957). La tectónica local habría contribuido tal y como registran los *microbeefs* con desplazamiento de cizalla en la Formación Vaca Muerta dentro del ámbito de la Cuenca Neuquina (Rodríguez *et al.* 2009).

El último evento de cementación se registra asociado a un carbonato IV, el cual reemplaza al carbonato III en las venillas y sella parcialmente espacios de porosidad interparticular relictos. Su mayor abundancia en las fracturas subperpendiculares a la fábrica original de la roca, permitirían interpretar que se trata de un fluido tardío, asociado a la exhumación por la tectónica andina en un momento posterior a la generación de los *beefs* y a la expulsión de hidrocarburos líquidos (Fig. 15e).



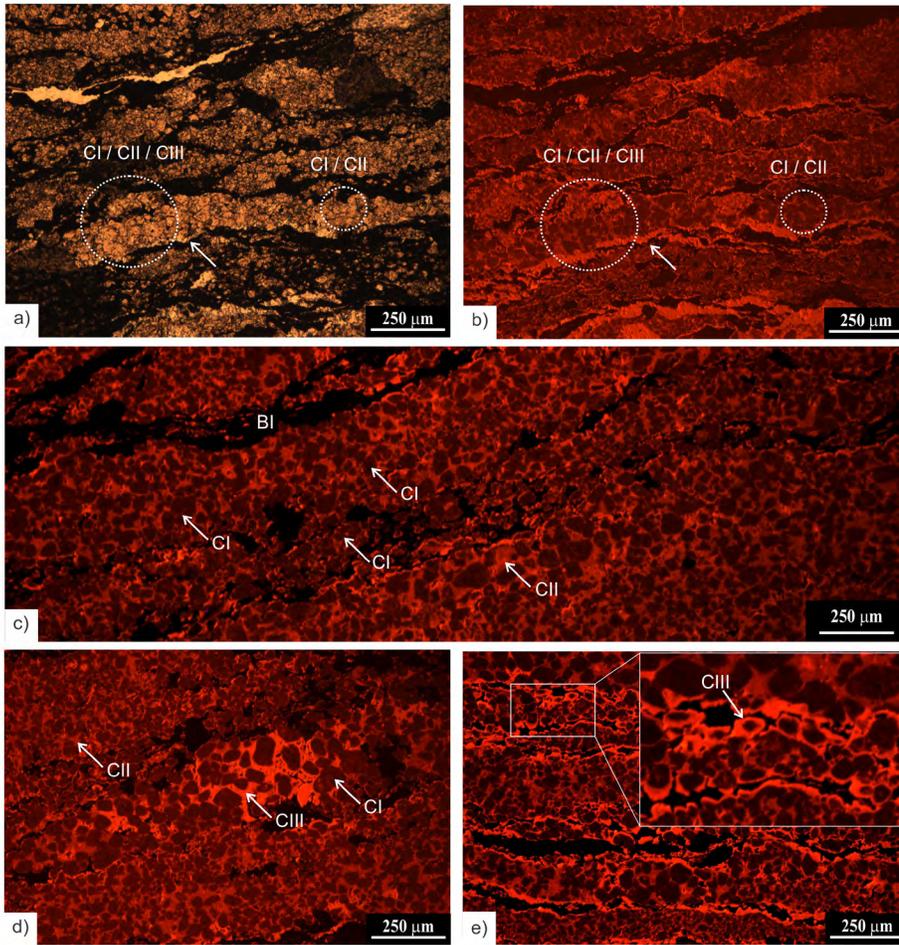
**Figura 10.** a) Fracturación tipo *beef* en los planos primarios del *bindstone*, con textura de relleno antitaxial y línea media cementada por bitumen (LT sin nicol); b-c) Detalle de a) donde se aprecian las fibras cristalinas de la calcita y la coalescencia de las microfracturas (LT sin y con nicol respectivamente); d-e) Desplazamiento de cizalla en los cristales fibrosos de calcita cementando el *beef* (LT sin y con nicol respectivamente).

## CONCLUSIÓN

En el *bindstone* basal de la Formación Vaca Muerta en la localidad de Pampa de Tril fueron identificados microscópicamente planos de migración primaria de hidrocarburos. Estos planos se vinculan a la fábrica de la roca y se disponen de manera paralela a la laminación biogénica del *bindstone* o discordante a la misma. Los planos acordes a la laminación paralela habrían facilitado la migración lateral de los primeros productos generados a partir de la maduración de la materia orgánica algácea mientras que los discordantes habrían facilitado la migración

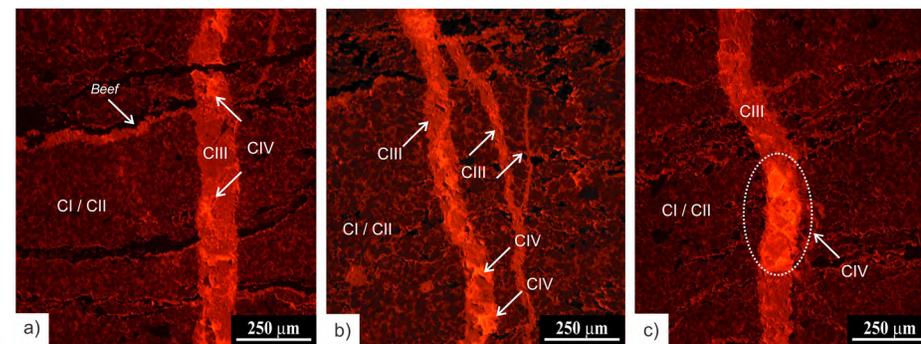
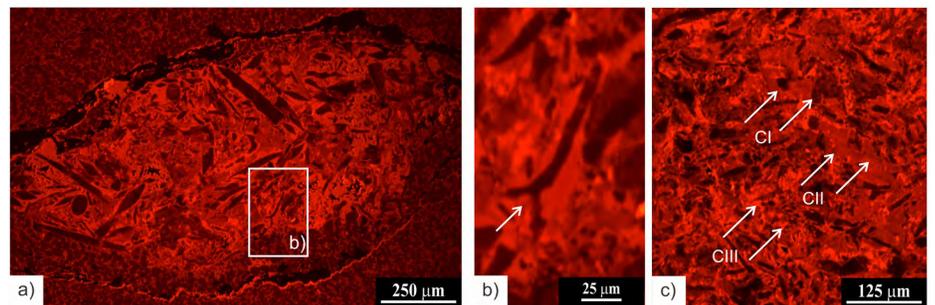
vertical. Ambos procesos serían los responsables de la expulsión del hidrocarburo generado en esta particular litofacies.

Los planos paralelos a laminación se habrían generado durante el proceso de crecimiento de la construcción biohermal, se habrían acentuado durante la diagénesis por el soterramiento y habrían adquirido mayor desarrollo durante la deformación y exhumación. Los planos discordantes tendrían un origen combinado atribuible al aumento de la presión interna de fluidos dado por la maduración de la materia orgánica y las presiones asociadas al tectonismo regional.

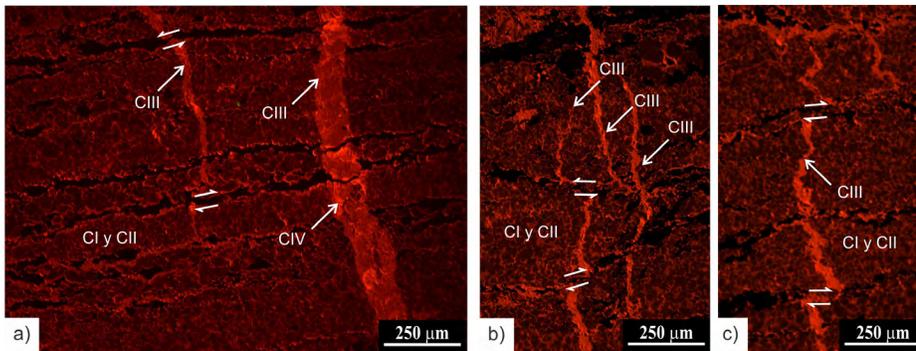


**Figura 11.** a-b) Fotomicrografía del *bindstone* (LT sinicol) y su análoga en el ensayo con catodoluminiscencia (CL) mostrando la presencia de tres luminiscencias distintas asignables a componentes primarios (Carbonato I) y cementos postdeposicionales de luminiscencia mayor (Carbonato II y III); c) Constituyentes de la fábrica laminar: formas husiformes (peloides) con luminiscencia tenue parda rojiza (CI) y cemento postdeposicional interparticular con luminiscencia parda rojiza levemente mayor (CII), bitumen (BI) en el límite entre las laminitas (CL); d) Luminiscencia anaranjada rojiza intensa del Carbonato III (CIII) en cemento interparticular aislado, reduciendo la porosidad selectiva (CL); e) Detalle de los constituyentes y cementos de la laminita donde se observa cemento isopáquico con luminiscencia asignable al Carbonato III (CIII) (CL).

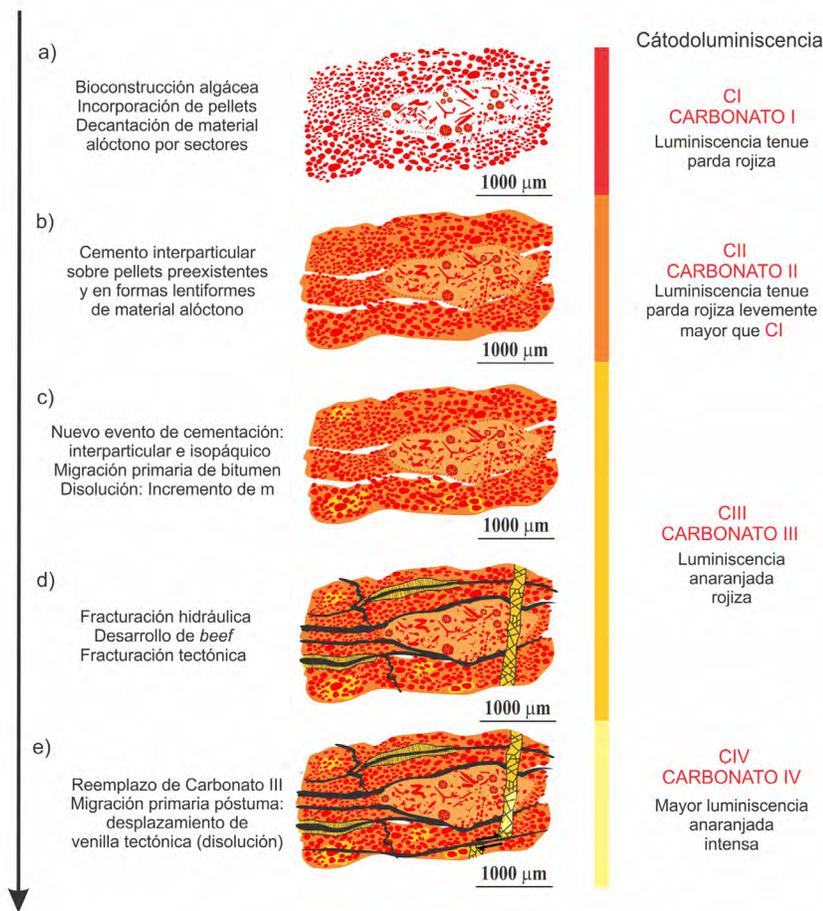
**Figura 12.** a) Formas lenticulares mostrando Carbonato I (CI) en los constituyentes y Carbonato II (CII) y III (CIII) en los cementos postdeposicionales (CL); b) Detalle de a) donde se observa una espícula con luminiscencia tenue parda rojiza (CI) (CL); c) Distribución de los carbonatos CI, CII y CIII en el interior del cuerpo lenticular, con la cementación asociada a CII y CIII reduciendo la porosidad interparticular (CL).



**Figura 13.** a-b) Distribución dominante del Carbonato III en los cementos de las fracturas tectónicas discordantes a la fábrica laminar del *bindstone* y en los *beefs* (CL); c) Participación del carbonato IV (CIV) como reemplazo en las venillas tectónicas discordantes, denotado por la luminiscencia anaranjada intensa (CL).



**Figura 14.** a-c) Distribución de Carbonato I, II III y IV en el *bindstone* y las fracturas cementadas, mostrando *offsets* asociados al plano de migración del bitumen (indicado por flechas conjugadas de cizalla) (CL).



**Figura 15.** Esquema general evolutivo que muestra la paragénesis inferida para los procesos de: a) sedimentación; b-c) estadios de cementación interparticular e isopáquica; d) migración primaria de hidrocarburo líquido y fracturación; e) *offset* de venillas asociado a disolución en planos de migración primaria. La presencia de los carbonatos reconocidos por su luminiscencia diferencial (CI, CII, CIII y CIV) se muestra sobre la margen derecha.

Esta investigación permitió la identificación, a través de cátodoluminiscencia, de varios eventos de cementación, fracturación y relleno en presencia de fluidos carbonáticos. Cuatro eventos de cementación carbonática fueron distinguidos por su morfología, modo de ocurrencia y diferente luminiscencia; el tercero de

ellos asociado a diagenesis freática. Esto permitió reconstruir la historia diagénica-estructural para el nivel analizado y vincularlos con la historia de migración primaria de hidrocarburos para la Formación Vaca Muerta en Pampa de Tril.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se financió con fondos otorgados por la Secretaría de Ciencia y Tecnología de la UNS (SECyT-UNS: PGI 24/H128). Los autores desean expresar su agradecimiento a los editores de este trabajo, Dr. Scasso y Dr. Kietzmann, por sus valiosos aportes los cuales mejoraron sustancialmente esta presentación. Se hace extensivo el agradecimiento al Departamento de Geología de la UNS por la utilización del equipamiento disponible tanto de campo como de laboratorio.

## REFERENCIAS

- Askenazi, A., Biscayart, P., Cánova, M., Montenegro, S. y Moreno, M. 2013. Analogía entre la Formación vaca Muerta y Shale Gas/Oil Plays de EEUU. Sociedad Internacional de Ingenieros en Petróleo (SPE), sección Argentina: 1-20.
- Banco, R., Otharán, G., Cacace, F., Cesaretti, N., Fortunatti, N. y Domínguez, E. 2014. Microfacies identificadas en muestras de afloramiento de la Formación Vaca Muerta (Pampa Tril) Cuenca Neuquina, Neuquén, Argentina. Mineralogía, Petrografía, Geoquímica y Fluorescencia. IX Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Actas CD, Mendoza.
- Cesaretti, N.N., Fortunatti, N.B., Rainoldi, A., Banco, R. y Otharán, G. 2016. Fosildiagenesis y timing de expulsión de hidrocarburos en la sección basal de la Formación Vaca Muerta en Pampa Tril, Neuquén, Argentina. VI Simposio Argentino del Jurásico, Actas: 11, Malargüe.
- Chebli, G., Mendiberry, H., Giusiano, A., Ibáñez G. y Alonso J. 2011. El shale gas en la provincia de Neuquén. VIII Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Actas: 669-691, Mar del Plata.
- Cruz, C., Villar, H. y Muñoz G.N. 1996. Los sistemas petroleros del Grupo Mendoza en la Fosa de Chos Malal, Cuenca Neuquina, Argentina. XIII Congreso Geológico Argentino y III Congreso de Exploración de Hidrocarburos, Actas I: 45-60, Buenos Aires.
- Choquette, P.W. y Pray, L.C. 1970. Geologic nomenclature and classification of porosity in sedimentary carbonates. American Association of Petroleum Geologists Bulletin 54: 207-250.
- Demaison, G.J. y Moore, G.T. 1980. Anoxic

- Environments and Oil Source Bed Genesis. Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists 64: 1179-1209.
- de Barrio, A., Ferraresi, P., Köhler, G., Marchal, D. y Blanco, S. 2017. Estudio comparativo de testigos corona de las dos secciones enriquecidas de la Formación vaca Muerta en la zona de shale gas, noroeste del engolfamiento neuquina. XX Congreso Geológico Argentino, Simposio Geología de la Formación Vaca Muerta, Actas: 23-30, San Miguel de Tucumán.
- Dunham, R.J. 1962. Classification of carbonate rocks according to depositional texture. En: Ham, W.E. (ed.), Classification of carbonate rocks. American Association of Petroleum Geologists, Memoir 1: 108-121, Tulsa.
- Embry, A.F. y Klovan, J.E. 1971. A Late Devonian reef tract on northeastern Banks Island, N.W.T.: Bulletin of Canadian Petroleum Geology 19: 730-781.
- Fortunatti N. B., Cesaretti, N.N., Banco, R.P. y Otharán, G.A. 2016. Caracterización de la fracturación natural y fluidos asociados para distintas microfacies en la Formación Vaca Muerta, Pampa Tril, Neuquén, Argentina. 1º Reunión sobre fluidos y deformación, Actas, Buenos Aires.
- García, M., Sorenson, F., Bonapace, J.C., Motta, F., Bajuk, C y Stockman, H. 2013. Vaca Muerta Shale Reservoir Characterization and Description: The Starting Point for Development of a Shake Play with Very Good Possibilities for a Successful Project. Unconventional Resources Technology Conference. Conference paper. DOI: 10.1190/urtec2013-090.
- Gonzalez Tomassini, F., Hryb, D., Palacio, J.P., Lazzari, V., Bertoldi, F. y Sagasti, G. 2017. Caracterización e impacto de las heterogeneidades identificadas en subsuelo en la Formación Vaca Muerta. XX Congreso Geológico Argentino, Simposio Geología de la Formación Vaca Muerta, Actas: 67-71, San Miguel de Tucumán.
- Kietzmann, D. A., Ambrosio, A., Suriano, J., Alonso, S., Vennari, V.V., Aguirre-Urreta, M.B., Depine, G. y Repol, D. 2014. Análisis sedimentológico y estratigráfico secuencial de las Formaciones Vaca Muerta y Quintuco en el área de Chos Malal, Cuenca Neuquina. IX Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Actas TT2: 269-288, Mendoza.
- Kietzmann, D., Ambrosio, A., Suriano, J., Alonso, M.S., Tomassini, F., Depine, G. y Repol, D. 2016. The Vaca Muerta-Quintuco system (Tithonian-Valanginian) in the Neuquen Basin, Argentina: A review from the outcrops in the Chos Malal fold and thrust belt. Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists 100: 743-771.
- Leanza, H. A., Sattler, F., Martínez, R. 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.J., Daniela, C. y Vallés, J.M. (eds.), Geología y Recursos Naturales de la Provincia del Neuquén: Buenos Aires, Argentina, Asociación Geológica Argentina: 113-129, Buenos Aires.
- Legarreta, L, Villar, H., Laffitte, G., Cruz, C. y Vergani, G. 2005. Cuenca Neuquina. En: Frontera Exploratoria de la Argentina. VI Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Actas: 233-250, Buenos Aires.
- Levorsen, A.I. 1973. Geología del Petróleo. Editorial Universitaria de Buenos Aires. 452 p., Buenos Aires.
- Marshall, D. y Mariano, A.N. 1988. Cathodoluminescence of Geological Materials. Unwin Hyman, 146 p., Boston.
- Longman, M.W. 1980. Carbonate diagenetic textures from nearshore diagenetic environments. American Association of Petroleum Geologists Bulletin 64: 461-487.
- Martínez, V., Musso, T., Pettinari, G. y Molina, A. 2017. Litofacies, mineralogía y caracterización de microfracturas naturales (venillas rellenas de calcita tipo *beef*) en el intervalo basal de la Formación Vaca Muerta en el Bajo de Añelo, Cuenca Neuquina. XX Congreso Geológico Argentino, Simposio Geología de la Formación Vaca Muerta, Actas: 85-90, San Miguel de Tucumán.
- Pettijohn, F.J. 1957. Sedimentary Rocks. Harper Brothers, 718 p., New York.
- Ramsay, J.G. 1980. The crack-seal mechanism of rock deformation. Nature 284: 135-139.
- Ramsay, J.G. y Huber, M.I. 1983. The techniques of modern structural geology, 1: Strain Analysis. Academic Press, 307 p., London.
- Rodríguez, N., Cobbold, P., Loseth, H. y Ruffet, G. 2009. Widespread bedding-parallel veins in fibrous calcite (*beef*) in a mature source rock (Vaca Muerta Formation, Neuquén Basin, Argentina): evidence for overpressure and horizontal compression. Journal of the Geological Society, London 166: 695-709.
- Slatt, R., Philp, P., O'Brian, B., Abusleiman, Y., Singh, P., Eslinger, E., Perez, R., Portas, R., Baruch, E., Marfurt, K. y Madrid-Arroyo, S. 2012. Pore-to-regional-scale, integrated characterization workflow for unconventional gas shales. En: Breyer, J.A. (ed.), Shale reservoirs. American Association of Petroleum Geologists Memoir 97: 5-10, Tulsa.
- Tissot, B.P. y Welte, D.H. 1984. Petroleum Formation and occurrence. Springer, 699 p., Berlín-Heidelberg-New York.
- Uliana M.A., Legarreta, L., Laffitte, G. y Villar, H.J. 2014. Estratigrafía y geoquímica de las facies generadoras de hidrocarburos en las cuencas petrolíferas de Argentina. IX Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Simposio de Recursos no Convencionales, Actas: 3-92, Mendoza.
- Villar H.J. y Laffitte, G.A. 1988. Composición petrográfica y generación de hidrocarburos en la Cuenca Cuyana (Triásico), Argentina. Primer Congreso Latinoamericano de Geoquímica Orgánica, Resúmenes, Actas: 17, Río de Janeiro.
- Weaver, C.E. 1931. Paleontology on the Jurassic and Cretaceous of West Central Argentina. Memoirs of the University of Washington, I. University of Washington Press, 594 p. Seattle.

Recibido: 27 de diciembre, 2017

Aceptado: 16 de mayo, 2018