

TRAZADORES DIAGENÉTICOS DE LAS PALEOMIGRACIONES DE HIDROCARBUROS EN LAS ARENISCAS ROJAS CRETÁICAS DEL GRUPO NEUQUÉN, CUENCA NEUQUINA

**Marta Franchini^{1,2}, Ana Rainoldi^{1,3}, Josefina Pons^{1,2}, Adolfo Giusiano⁴, Agnes Impicini², Nora Cesaretti³,
Daniel Beaufort⁵, Patrice Patrier⁵**

1: Cons. Nac. de Invest. Cient. y Téc., C. Patagónico de Estudios Metalogenéticos, Argentina. mfranchini@speedy.com.ar

2: Depto. de Geología y Petróleo, Ftad. de Ingeniería, Univ. Nac. del Comahue, Buenos Aires 1400, (8300) Neuquén, Arg.

3: Depto. de Geología, Universidad Nacional del Sur, San Juan 670, (8000) Bahía Blanca, Argentina

4: Subsecretaría de Minería e Hidrocarburos, Irigoyen 436, Piso 4, (8300) Neuquén, Argentina

5: Université de Poitiers, IC2MP, CNRS-UMR 7285, Hydrasa, Bâtiment B08, Rue Albert Turpin, F-86022 Poitiers Cedex, France

Palabras clave: **Facies diagenéticas, fluidos reductores, frente redox, paleo-flujos, Cuenca Neuquina**

ABSTRACT

Diagenetic tracers of hydrocarbon paleo-migrations in Cretaceous red beds of the Neuquén Group, Neuquén Basin

Striking arrangement of colorful facies in the sandstones outcrops of the Candeleros, Huincul, and Portezuelo formations at Los Chihuidos high (Neuquén Group) and at the Huincul Ridge has been attributed to the surface expression of hydrocarbon-induced alteration. According to visual distinctions, four diagenetic facies have been recognized: red, white, gray, and brown sandstones. Differences in the mineralogy between sandstones facies depend on the degree of interaction with hydrocarbon-bearing solutions and the relative position of the redox roll front developed during this process. The red facies represents the original oxidized sandstones with hematite, kaolinite or corrensite, quartz and albite overgrowths, and calcite cement precipitated under oxidizing conditions during the regional burial diagenesis. The white facies formed during the interaction of red beds with hydrocarbons-organic acids, where clasts and cement were partially dissolved, iron was reduced to Fe²⁺ and removed or precipitated as pyrite, resulting in the sandstone decoloration and in a notorious enhancement of the secondary porosity. Only minor montmorillonite precipitated replacing kaolinite and detrital feldspars and multistage calcite filling the pores. The gray and the brown sandstones locally bound the redox front with abundant clay and oxide minerals. Montmorillonite and secondary hematite are dominant in the more oxidized gray sandstones whereas interstratified chlorite-montmorillonite is more abundant in the more reduced brown sandstones. The coexistence of these minerals indicates metastable reducing-oxidizing conditions at the redox front. This multi-scale study of patterns of bleaching in a succession of clastic rocks allowed the definition of a redox system at regional scale linked to structure controlled upflow of hydrocarbons and associated fluids, and the chemical reactions between reducing fluids and diagenetic minerals.

INTRODUCCIÓN

Los patrones de decoloración de areniscas rojas asociados a la migración de fluidos reductores, entre ellos los hidrocarburos, son cada vez más reconocidos en el registro geológico (Schumacher 1996; Chan *et al.*, 2000; Garden *et al.*, 2001; Beitler *et al.*, 2003, 2005; Parry *et al.*, 2004, 2009; Schöner y Gaupp 2005). La decoloración proporciona evidencias de la antigua presencia de fluidos reductores extra-formacionales, cuya interacción con los minerales diagenéticos de la roca hospedante genera la disolución de la hematita y la extracción del hierro de las areniscas o bien la re-precipitación del hierro como sulfuro (Surdam *et al.*, 1993). La mayoría de los trabajos previos sobre este tema corresponden a estudios realizados en las rocas de la meseta del Colorado, en Utah (Chan *et al.*, 2000; Garden *et al.*, 2001; Beitler *et al.*, 2003, 2005; Parry *et al.*, 2004, 2009) y en la Cuenca Central Europea de Alemania (Schöner y Gaupp 2005; Hilse *et al.*, 2010). Los datos que proporcionan este tipo de estudios permiten reconstruir las vías de migración de los hidrocarburos en el pasado y ayudan a comprender los controles geológicos del flujo de los fluidos en subsuelo.

En esta contribución se presenta una síntesis de los resultados de la investigación sobre la decoloración de las areniscas rojas del Grupo Neuquén en áreas seleccionadas del Dorso de Los Chihuidos y de la Dorsal de Huincul, con especial énfasis en la comprensión de la naturaleza de las alteraciones diagenéticas relacionadas a la migración de los hidrocarburos (ver Rainoldi *et al.*, 2014; Pons *et al.*, en prensa). Este estudio representa el primer intento en América del Sur de relacionar en forma exhaustiva los patrones de las alteraciones diagenéticas en secuencias sedimentarias de estratos rojos con las condiciones de los paleo-flujos de fluidos en una cuenca rica en hidrocarburos.

MARCO GEOLÓGICO REGIONAL

Las zonas seleccionadas para este estudio se localizan en las unidades morfoestructurales Dorsal de Huincul (DH; Cerro Granito y Barda González) y Dorso de Los Chihuidos (DCh; sector norte) (Figura 1A-B). El DCh representa una estructura anticlinal con vergencia hacia el oeste (Mosquera y Ramos 2006), cuya asimetría se debe a la inclinación diferencial de sus flancos con una pendiente de 20° en su flanco occidental y sólo 4 a 5° en su flanco oriental, que a su vez está recubierta por una serie de pliegues secundarios desarrollados a lo largo de su eje principal (Mosquera y Ramos 2006). El levantamiento del DCh se generó por la inversión tectónica de hemigrábenes triásicos (Precuyano) en una cuenca de retroarco (Cristallini *et al.*, 2005; Maretto y Pángaro 2005) o bien por una inversión transpresiva relacionada con la subducción oblicua durante el Jurásico-Cretácico Inferior (Sinemuriano-Valangiano) (Mosquera y Ramos 2006). La configuración final de esta estructura se habría desarrollado durante el Terciario con los movimientos ándicos. La Dorsal de Huincul representa un cinturón de deformación de intraplaca que

se extiende a lo largo de 300 km de longitud en sentido E-O. Consiste en un sistema de hemigrábenes oblicuos a la Cordillera de los Andes, desarrollados en un sistema dextral transpresivo (Mosquera y Ramos 2006).

Los afloramientos del Grupo Neuquén tienen amplia distribución en el DCh y la DH. El Grupo Neuquén constituye una sucesión sedimentaria que se divide en tres subgrupos y siete formaciones: las formaciones Candeleros, Huincul y Lisandro del Subgrupo Río Limay; las formaciones Portezuelo y Plottier del Subgrupo Río Neuquén y las formaciones Bajo de la Carpa y Anacleto del Subgrupo Río Colorado (Ramos 1981). El Subgrupo Río Limay (De Ferrariis 1968) comprende sedimentos fluviales depositados durante el Cenomaniano al Turoniano Medio y el Subgrupo Río Neuquén

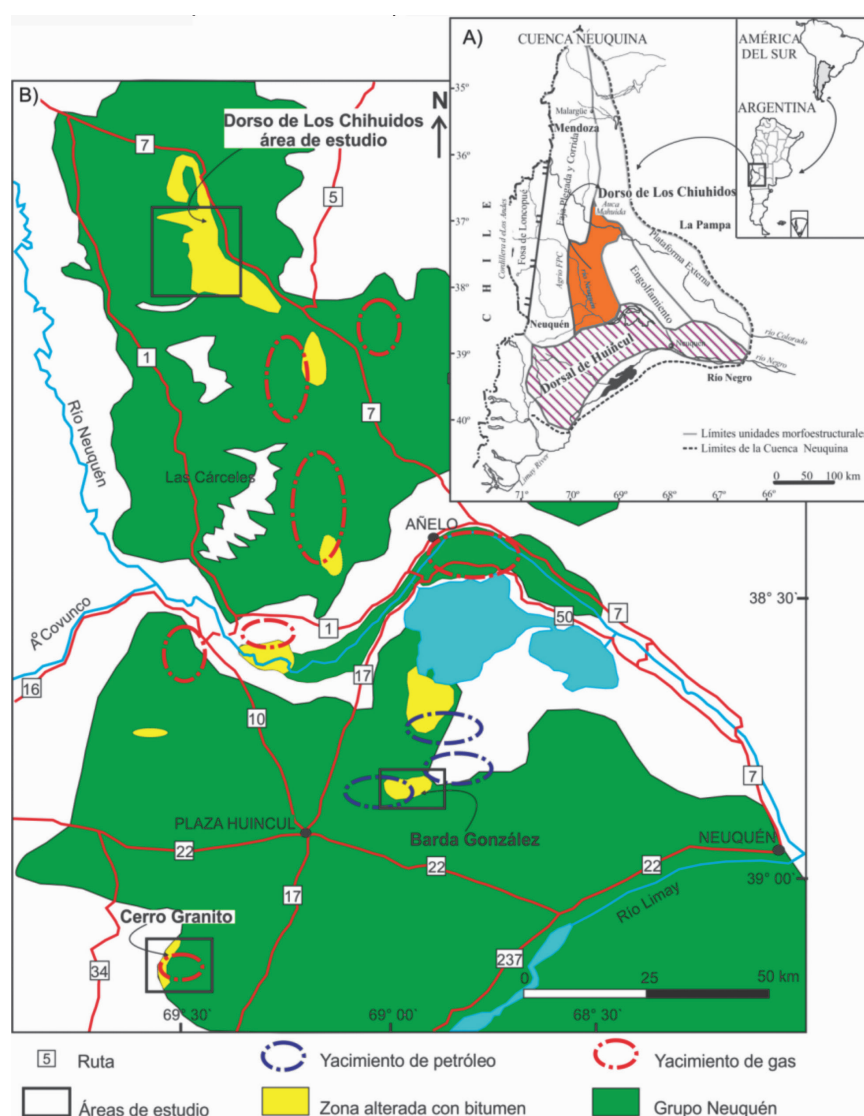


Figura 1. A) Mapa de las unidades morfoestructurales de la Cuenca Neuquina con la ubicación del Dorsal de Los Chihuidos y la Dorsal de Huincul. B) Mapa que muestra los afloramientos del Gr Neuquén en el centro-este de la cuenca, la ubicación de las áreas de estudio, las zonas con areniscas alteradas y los yacimientos hidrocarburíferos próximos a ellas.

(Cazau y Uliana 1973) las rocas sedimentarias depositadas durante el Turoniano Tardío al Coniaciano Tardío. En las áreas seleccionadas, se analizaron las unidades basales del Subgrupo Limay, formaciones Candeleros y Huincul y la unidad basal del Subgrupo Río Neuquén, la Fm Portezuelo.

La Fm Candeleros (Keidel en Wichmann 1927) representa un sistema de canales efímeros de abanicos terminales que aportaron periódicamente, hacia un sector deprimido, una importante carga de sedimento fango-arenoso dando lugar a la generación de barreales ligeramente salinos (Garrido, 2010). Los depósitos se encuentran caracterizados por el desarrollo de canales de baja sinuosidad (tipo entrelazado), asociados a depósitos de planicie de inundación fangosa con marcado desarrollo de paleosuelos (Garrido, 2010). La Fm Huincul (Keidel en Wichmann 1927) apoya en contacto erosivo sobre la Fm Candeleros. Se caracteriza por depósitos fluviales de baja sinuosidad de tipo entrelazado arenoso y gravo-arenoso (Garrido 2010) con importante desarrollo de llanuras de inundación. La Fm Portezuelo (Keidel en Wichmann 1927) constituye depósitos fluviales entrelazados con fluctuaciones en el nivel de descarga (Sánchez *et al.*, 2005).

METODOLOGÍA

Se realizó el mapeo de detalle de las areniscas rojas y decoloradas en el norte del DCh y en las áreas Cerro Granito y Barda González de la DH (Figura 1B). Con el análisis y procesamiento de la imagen satelital LANDSAT 7 ETM+ se realizó el mapeo regional del área del DCh donde la zona decolorada es extensa. La combinación RGB 741 fue la más adecuada para el empleo de la clasificación supervisada con la cual se delimitó el área de alteración. En los prospectos de la DH se mapearon en el campo las unidades rojas y alteradas, las estructuras y otros rasgos notorios como los tubos de hidrocarburos, tubos de carbonato, entre otros.

Se relevaron perfiles estratigráficos con el báculo de Jacob y se seleccionaron muestras representativas de cada una de las facies diagenéticas para estudios de laboratorio.

Las muestras se analizaron con lupa binocular y en cortes delgados petro-calcográficos con microscopios de los laboratorios de la Universidad Nacional del Comahue y de la Universidad Nacional del Sur. Cortes delgados de muestras con cemento carbonático fueron teñidos con rojo de alizarina y ferricianuro potásico para determinar la composición de los carbonatos mientras que para la determinación de la porosidad se realizaron cortes delgados con resina epoxy teñida de azul. Se obtuvieron las modalidades detríticas por conteo de puntos (300 puntos) en cada una de las facies diagenéticas. La cuantificación de la composición modal, porosidad y cementos se determinó mediante el empleo del software JMicroVision V.1.2.7.

El análisis mineralógico de las arcillas se realizó con difracción de rayos X en el Centro de Minerales Arcillosos de la Universidad Nacional del Comahue y en el Laboratorio Hydras de la Universidad de Poitiers (Francia). Trozos de roca y cortes delgados se observaron con el Microscopio

pio Electrónico de Barrido (MEB). Se analizó la composición química de los minerales arcillosos con un MEB JEOL® 5600 acoplado con un detector de espectroscopía de energía dispersiva de rayos X (EDX) Bruker de la Universidad de Poitiers. Los espectros infrarrojos (MIR) (400 a 4000 cm⁻¹) fueron obtenidos utilizando un espectrómetro Nicolet 760FT en el laboratorio Hydrasa en *pellets* preparados con muestras diluidas con KBr.

RESULTADOS

Determinación de facies diagenéticas en un sistema redox

En las zonas de estudio, las areniscas rojas de las formaciones Candeleros, Huincul y Portezuelo están alteradas. La alternancia de estratos de areniscas con diferentes coloraciones es un rasgo común y se diferencian unas de otras por la asociación de minerales autigénicos y la porosidad, por lo que se agruparon en facies diagenéticas siguiendo el criterio de Beitler *et al.* (2005). En el campo se reconocieron cuatro facies diagenéticas: las areniscas rojas, las areniscas blancas, las areniscas grises y las areniscas marrones. Las facies roja y blanca tienen mayor distribución regional que las areniscas grises y marrones; estas dos últimas generalmente se encuentran en el contacto entre las dos anteriores.

Distribución espacial de las facies diagenéticas

Sobre el flanco oriental del DCh, es posible observar en las imágenes satelitales Landsat-RGB 321 y 741 una clara diferenciación entre las areniscas decoloradas y las areniscas rojas originales (Figura 2A, B). Con la última combinación de bandas puede apreciarse un frente de alteración en la Formación Huincul de 30 km de largo x 12 km de ancho de tonalidades blancas en contacto con las areniscas rojas hacia el oeste (Figura 2B). Este frente pierde intensidad hacia el este hasta llegar a un nuevo frente norte-sur (Figura 2B; segunda línea punteada) a partir del cual se desvanece y pasa nuevamente hacia las areniscas rojas sin alterar. Cuando el cambio de coloración ocurre dentro de un estrato sedimentario con condiciones petrofísicas homogéneas, las areniscas decoloradas se encuentran siempre por encima de las rojas, indicando la capacidad de flotabilidad e inmiscibilidad de los fluidos reductores respecto a las aguas de formación (Figura 2D). En el campo, el pasaje de una facies diagenética a otra puede ser muy variado, ya sea siguiendo la estratificación o cortando los límites estratigráficos (Figura 2E). La decoloración preferencial de superficies sedimentarias indica que estas zonas de mayor permeabilidad actuaron como canales de migración de los fluidos reductores.

No sólo la permeabilidad de los estratos influyó en el pasaje de los fluidos que alteraron las rocas sino también su interconexión. Por ejemplo, en la zona del DCh el arreglo de los elementos arquitecturales depositacionales ha tenido un rol fundamental en la decoloración de las areniscas.

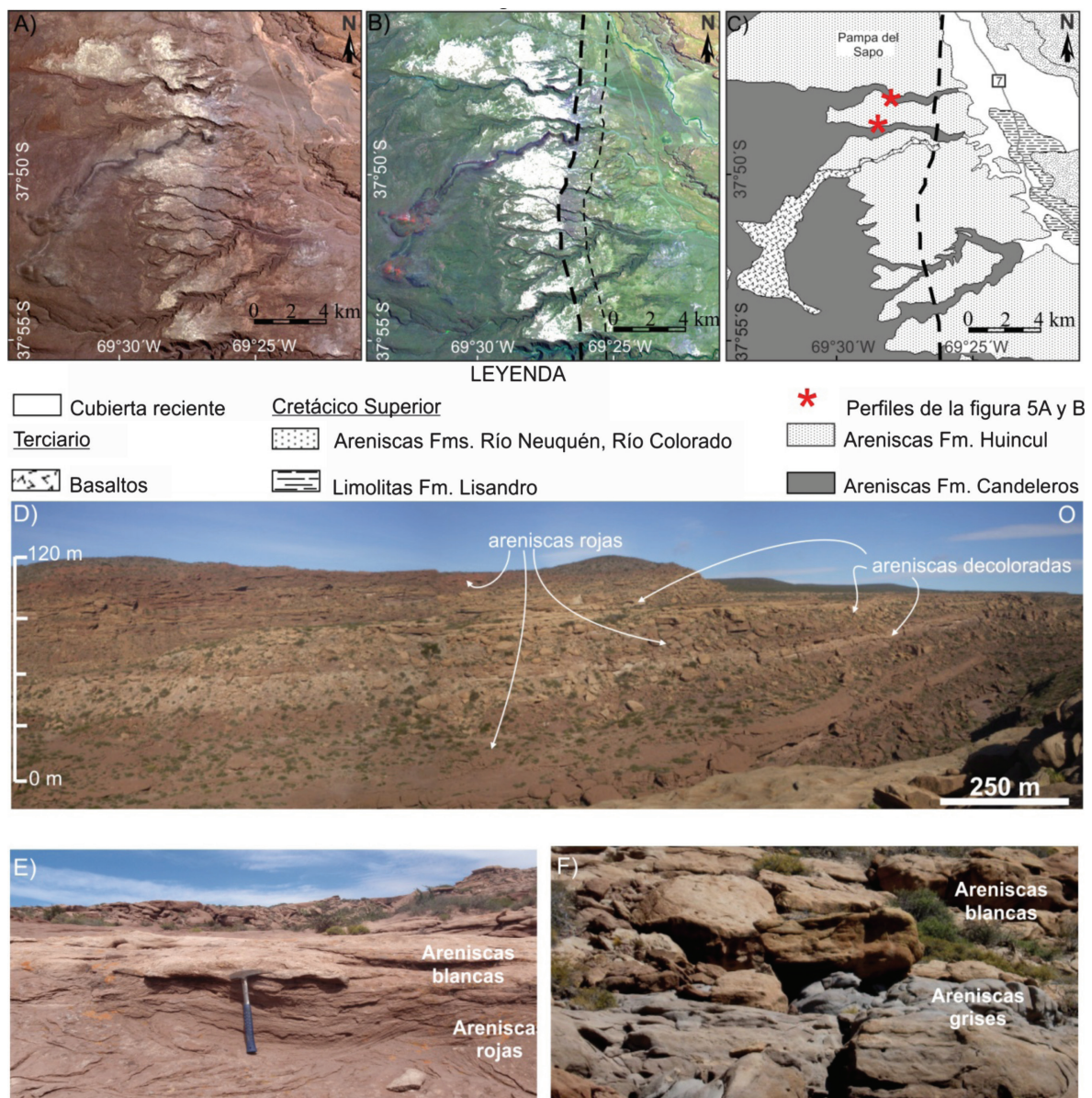


Figura 2. A) Imagen Landsat ETM+ RGB 321. B) Imagen Landsat ETM+ RGB 741 con superposición de la clasificación supervisada en blanco. Las líneas punteadas marcan el frente de alteración con las areniscas decoloradas al oeste, las rojas al este y la zona de transición entre ambas. C) Mapa geológico donde se observa que el cambio de coloración no responde a un cambio formacional. D) Vista panorámica del pasaje de las areniscas rojas a las blancas. E) Contacto areniscas rojas-areniscas blancas dentro de un estrato sedimentario donde el cambio de la coloración corta la estratificación entrecruzada en artesa. F) Detalle del afloramiento de las areniscas grises-areniscas blancas.

En la parte inferior de la Fm Huincul, caracterizada por una baja relación suministro/acomodación de los sedimentos, se desarrollan paleocanales intercalados con espesos depósitos de llanura de inundación, donde domina la facies roja, mientras que los estratos de la sección superior, donde predominan los paleocanales amalgamados con relictos de la llanura de inundación con una alta relación suministro/acomodación, los estratos se encuentran alterados y decolorados (Figura 3A, B, C). También hay estratos de areniscas rojas con decoloraciones de forma circular o *spots* de

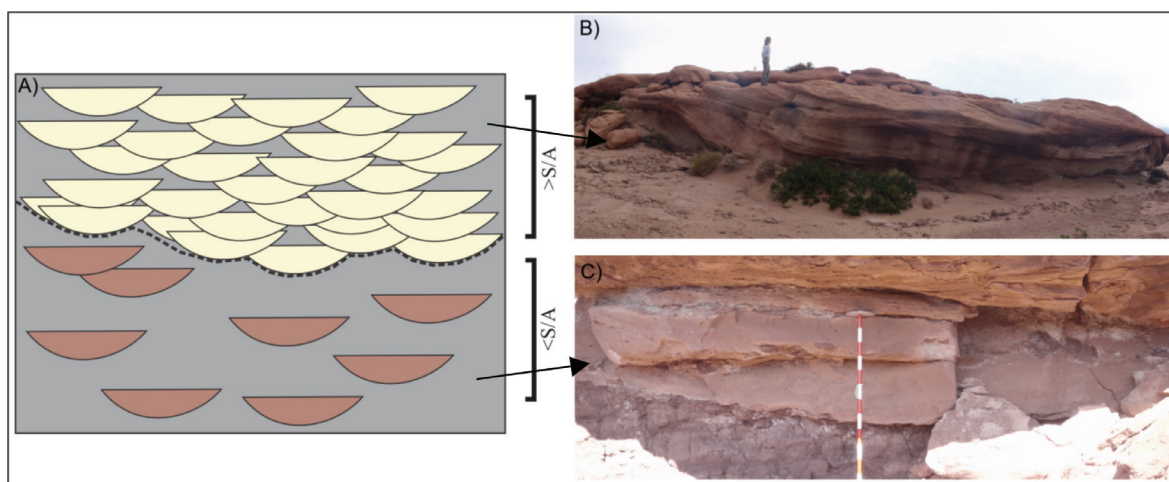


Figura 3. A, B, C) Rol de los elementos arquitecturales de la Fm Huincul, DCh, en la decoloración de los estratos. Ver texto para explicación.

reducción que han sido interpretadas como zonas de reducción localizada durante la eodiagénesis (Bensing *et al.*, 2005) que habrían inhibido el enrojecimiento de ese sector (probablemente asociado a la presencia de un resto orgánico reductor).

El cambio de facies puede ocurrir entre sucesivos estratos de una misma formación. Un ejemplo del mismo se observa en el Cerro Granito donde las areniscas de grano fino y las pelitas de la Fm Candeleros se preservan rojizas mientras que los bancos de granulometría más gruesa de esta formación y las areniscas de la Fm Huincul, compuestas por granulometrías gruesas dominantes, se encuentran totalmente decoloradas (Figura 4A, C, E, F, G). También en esta zona los bancos de areniscas de la Fm Huincul están intercalados con abundantes depósitos de llanura de inundación. En estos casos, las zonas más permeables de los paleocanales de granulometría gruesa están decolorados en tanto que los estratos de menores granulometrías (limolitas) preservan su coloración rojiza original (Figura 4D, G).

Petrografía y composición modal de las formaciones Candeleros, Huincul y Portezuelo

Las formaciones Candeleros, Huincul y Portezuelo consisten en areniscas de grano muy grueso a fino con selección media a moderada y texturalmente inmaduras (Candeleros y Huincul) a maduras (Portezuelo), con participación variable de conglomerados de grano fino matriz-soportados y niveles pelíticos (Figura 5A, B, C, D). En líneas generales se observó que en la Fm Candeleros predominan las areniscas de grano fino y las pelitas mientras que en las formaciones Huincul y Portezuelo predominan las areniscas de grano grueso. Con un promedio general $Q_{15}F_{19}L_{66}$, $Q_{29}F_{28}L_{43}$ y $Q_{58}F_{23}L_{19}$ para las areniscas de Candeleros, Huincul y Portezuelo respectivamente, se observa una transición progresiva en la mineralogía de estas formaciones, que de acuerdo a Folk *et al.* (1970) clasifican como litoarenitas, litoarenitas feldespáticas y feldarenitas líticas, respectivamente.

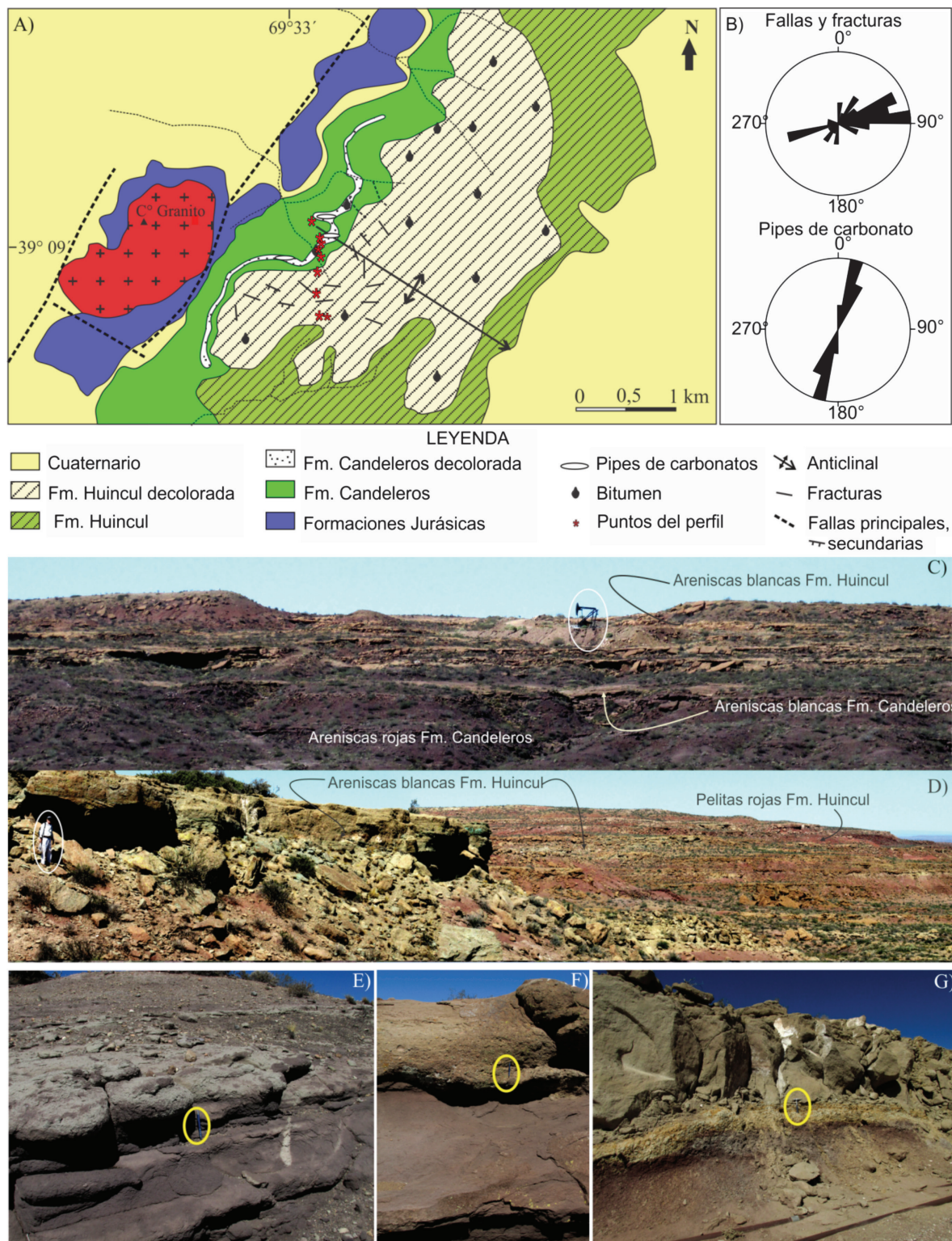


Figura 4. A) Mapa geológico del área del cerro Granito (modificado de Leanza y Hugo 1993). B) Orientación de fallas, fracturas y pipes de carbonato. C) Areniscas rojas y decoloradas (blancas) de la Fm Candeleros. D) Areniscas decoloradas y pelitas rojas intercaladas de la Fm Huincul. E) Contacto areniscas rojas-areniscas blancas Fm Candeleros. F) Contacto areniscas rojas Fm Candeleros-areniscas blancas Fm Huincul. G) Contacto areniscas blancas-pelitas rojas Fm Huincul, en la zona del contacto las pelitas están decoloradas.

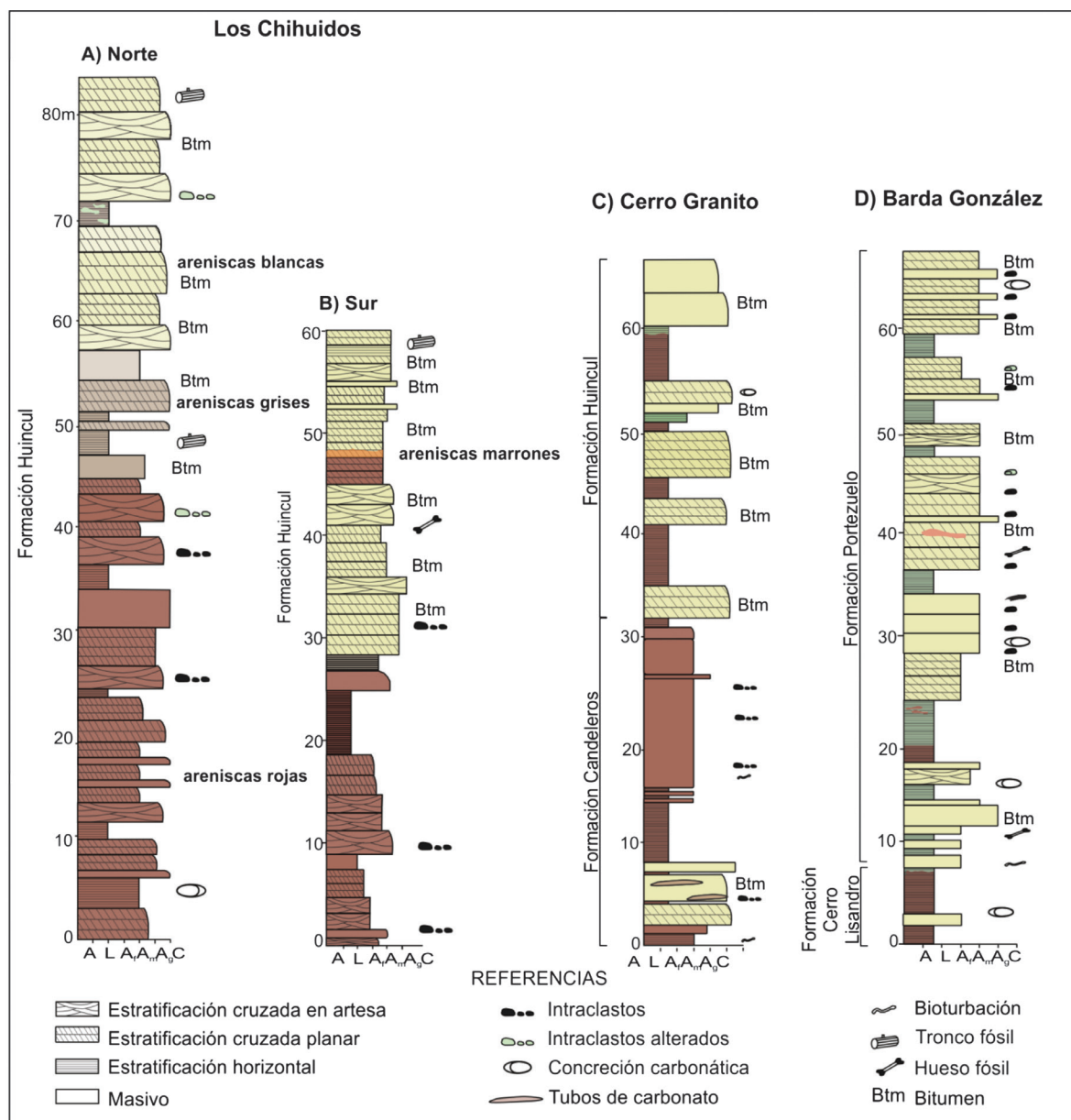


Figura 5. A-B) Columnas estratigráficas del área DCh (modificado de Rainoldi *et al.*, 2014), C) del área del Cerro Granito y D) Barda González (modificado de Pons *et al.*, en prensa)

Si bien estas tres formaciones presentan una mineralogía modal similar, las proporciones relativas de sus componentes detríticos son diferentes. La Fm Candeleros se caracteriza por una mayor abundancia de fragmentos líticos volcánicos de composición básica y mesosilícica y menor cantidad de feldespatos y cuarzo que la Fm Huincul. En la Fm Portezuelo es menor aún la cantidad de fragmentos líticos pero aumenta la cantidad de cuarzo y feldespato, y el feldespato potásico es más abundante que las plagioclasas. Estas diferencias en la composición modal obedecen a cambios en el área de proveniencia según el diagrama QFL de Dickinson *et*

al. (1983) donde la fuente de aporte de la Fm Candeleros es un arco sin disectar evolucionando a arco transicional-arco disectado para la Fm Huincul y a orógeno reciclado para la Fm Portezuelo.

Facies de areniscas rojas

Las areniscas rojas de la Fm Huincul en el DCh (Figura 6A) presentan coatings de hematita (Figura 6B); además tienen hematita como relleno de poros y como reemplazo de clastos de magnetita y de fragmentos volcánicos. La caolinita rellena los poros (Figura 6C). Los clastos de cuarzo y feldespato presentan crecimientos secundarios de cuarzo y albita (Figura 6B, D), respectivamente, que precipitaron por encima de los coatings de hematita. Calcita no ferrosa está en contacto neto con los crecimientos secundarios de cuarzo y calcita ferrosa reemplaza los clastos y los crecimientos secundarios (Figura 6D) (Rainoldi *et al.*, 2014).

En el Cerro Granito, las areniscas rojas de la Fm Candeleros (Figura 6E) presentan coatings de hematita (Figura 6F). Junto con hematita y recubriendo también la superficie de los clastos hay *coatings* de corrensite (Figura 6G), un interestratificado regularmente ordenado de clorita-esmectita. Se observaron cementos silíceos de diferentes texturas y tamaños. Los micro ($\sim 5 \mu\text{m}$) y meso ($\sim 20 \mu\text{m}$) cristales de cuarzo desarrollan prismas hacia el centro del poro (Figura 6H) y los sobrecrecimientos de cuarzo envuelven en continuidad óptica al cuarzo detrítico. En las muestras de la Fm Candeleros predominan las variedades de micro y meso-cuarzo. Analcima y calcita (calcita I) obturan los espacios intergranulares y reemplazan los clastos (Figura 6H).

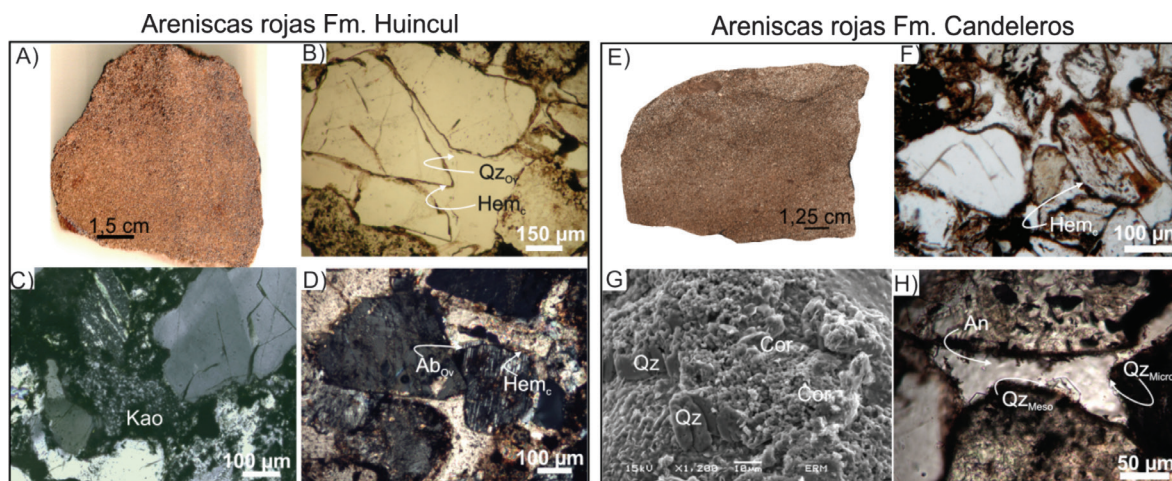


Figura 6. A) Arenisca roja Fm Huincul, DCh. B) Microfotografía que muestra los coatings de hematita (Hem) y sobrecrecimientos de cuarzo (QzOv). C) Caolinita (Kao) rellena poros. D) Sobrecrecimientos de albita (Ab) y cemento de calcita. E) Areniscas rojas Fm Candeleros, DH. F) Microfotografía que muestra los coatings de hematita (Hem). G) Imagen SEM que muestra los *coatings* de corrensite (Cor) sobre cristales de cuarzo (Qz.). H) Micro (QzMicro), meso-cuarzos (QzMeso) y cemento de analcima (An).

En el Cerro Granito y en Barda González la facies roja de las formaciones Huincul y Portezuelo ha sido preservada únicamente en los estratos pelíticos menos permeables y más espesos de la sucesión (p. ej. Figura 3D). Estos depósitos tienen *coatings* de hematita recubriendo los clastos de la roca y son los responsables de su coloración rojiza.

Facies de areniscas alteradas

Dorso de los Chihuidos

Numerosos rasgos de disolución fueron observados en las areniscas decoloradas (Figura 7A), entre ellos pueden citarse: 1) senos de disolución en los crecimientos secundarios de cuarzo, 2) los cristales pseudo-hexagonales de caolinita tienen los bordes redondeados, 3) hay un notorio incremento de la porosidad de la roca, la cual incrementa progresivamente desde las areniscas rojas, a las grises, marrones y finalmente a las blancas por disolución de los clastos, en especial de los más lábiles como fragmentos volcánicos y feldespatos, de los cementos calcáreos y de las arcillas autígenicas (p. ej. caolinita) (Rainoldi *et al.*, 2014).

Facies de areniscas blancas. En las areniscas blancas trazas de hematita han sido preservadas entre los crecimientos secundarios de cuarzo y feldespato y los clastos. La caolinita muestra fenómenos de disolución y se observaron nuevos minerales, entre ellos la esmectita que se encuentra en láminas como *coatings* y como producto de la alteración de feldespatos y fragmentos volcánicos. Esta esmectita es posterior a la caolinita, a la cual reemplaza (Figura 7B).

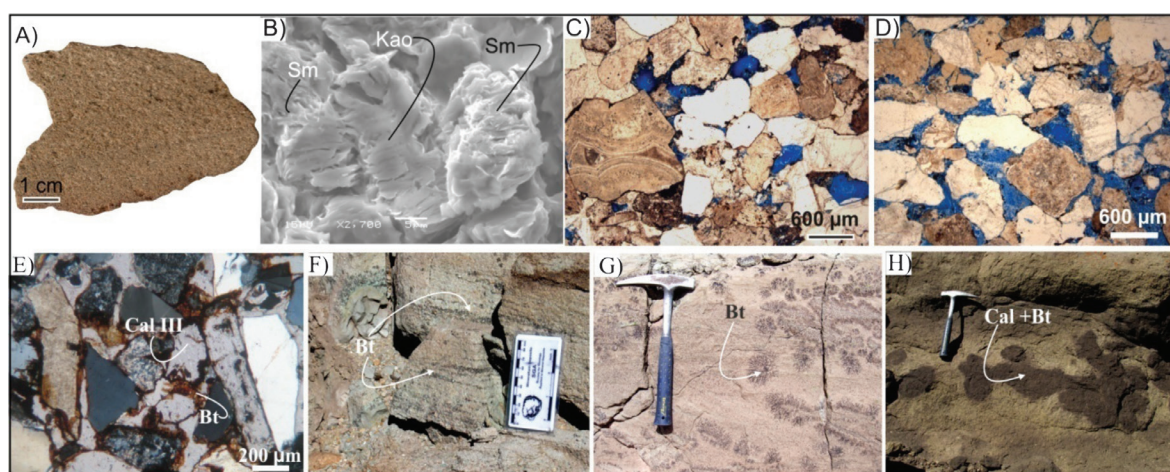


Figura 7. A) Arenisca blanca Fm Huincul, DCh. B) Imagen SEM de esmectita (Sm) que reemplaza cristales de caolinita previos (Kao). C), D) Microfotografías que muestran el incremento de la porosidad desde la arenisca roja (6,62%) a la arenisca blanca (23,27%); Fm Huincul, DCh. E) Microfotografía de la arenisca blanca Fm Huincul con bitumen (Bt) y calcita tardía (Cal III). F) Bitumen delineando los planos de estratificación de la arenisca, Fm Huincul, DCh. G) Plumas y gotas de bitumen en arenisca blanca de la Fm Portezuelo, Barda González, DH. H) Nódulos y pipes de carbonato y bitumen en la Fm Candeleros, Cerro Granito, DH.

Los crecimientos secundarios de albita y el feldespato potásico detrítico (ortoclasa) están bien preservados. El desarrollo de poros sobredimensionados y texturas de grano flotante da lugar al incremento de la porosidad secundaria (~23%) (Figura 7C, D). Finalmente, la presencia de calcita poikilotópica que incluye clastos detríticos con bordes corroídos y la textura de clastos flotantes (Figura 7E), sugieren una precipitación tardía que tuvo lugar luego de intensos procesos de disolución. La distribución de la calcita es heterogénea, y cuando es muy abundante puede llegar a reducir completamente la porosidad de la roca. Esta calcita contiene numerosas inclusiones fluidas con hidrocarburos. Impregnaciones de bitumen se disponen entre los cristales del cemento carbonático poikilotópico, sobre la superficie de los clastos y del cemento carbonático como así también en las microfracturas intragranulares (Figura 7E). Además de las impregnaciones, se observaron en el campo tubos, bitumen en gotas y diseminado, preferentemente siguiendo los planos de estratificación de la arenisca (Figura 7F). Los fragmentos líticos volcánicos y volcanoclásticos muestran deformación pseudo-dúctil y los clastos de cuarzo y feldespato con un comportamiento más rígido, presentan numerosas fracturas intragranulares con disposición aleatoria.

Facies de areniscas grises y marrones. En las areniscas grises (Figuras 5A, B; 8A) la esmectita es mucho más abundante que en la facies blanca según la intensidad de los difractogramas de rayos X, y su composición es cercana a montmorillonita (Rainoldi *et al.*, 2014). La montmorillonita se encuentra generalmente asociada al interestratificado clorita-montmorillonita, a agregados de microcristales de cuarzo y a cristales de hematita secundaria con el típico arreglo en roseta; al igual que en las areniscas blancas montmorillonita reemplaza a los cristales de caolinita (Figura 8B, C, D). Cuando el interestratificado clorita-montmorillonita predomina sobre la montmorillonita, las

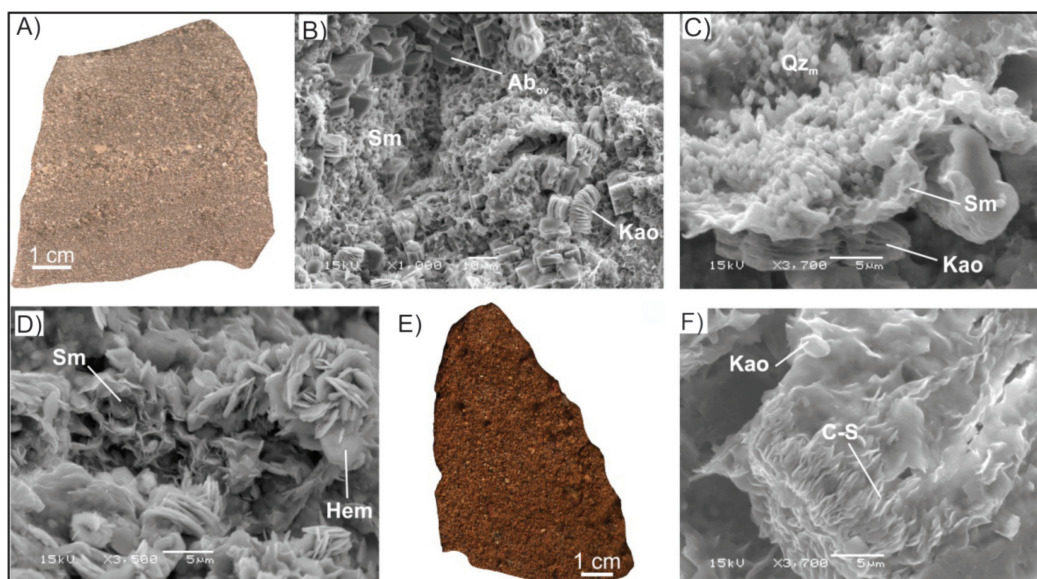


Figura 8. A) Arenisca gris Fm Huincul, DCh. B-C-D) Imágenes SEM de esmectita (Sm) que reemplaza al feldespato (Ab) y a caolinita (Kao) con cuarzo (Qz) y cristales hexagonales de hematita (Hem). E) Arenisca marrón Fm Huincul, DCh. F) Interestratificado clorita-esmectita (C-S) reemplaza a caolinita previa (Kao) que muestra los bordes cristalinos redondeados debido a la disolución.

areniscas se tornan marrones (Figuras 5A, B; 8E, F), definiendo así la facies de areniscas marrones. Los análisis químicos MEB-EDAX muestran trazas de Cu y/o V en montmorillonita, en el interestratificado clorita-esmectita y en hematita.

En sectores, en vez del interestratificado clorita-montmorillonita se halló el interestratificado illita-esmectita con alto contenido de illita y concentraciones de vanadio. Las areniscas grises y marrones contienen bitumen como impregnaciones aleatorias en los clastos detríticos y a diferencia de las facies roja y blanca, no presentan cemento carbonático. La porosidad ha sido incrementada por los procesos de disolución de clastos y cementos previos.

Dorsal de Huincul

Facies de areniscas blancas. En la Fm Candeleros, los estratos de areniscas de grano grueso están decolorados mientras que los estratos de areniscas de grano medio-fino y los estratos pelíticos se encuentran sin alterar. Del mismo modo que en el área de DCh, las areniscas blancas se caracterizan por la ausencia de los coatings de hematita, los cuales han sido preservados en el contacto entre clastos y los precipitados autigénicos (por ej. analcima). La corrensita se preserva como coatings pero tiende a desaparecer de la superficie de los clastos junto con una intensa lixiviación de los cristales de micro y meso-cuarzo. La analcima presenta superficies de disolución y reemplazo por calcita (calcita II). A diferencia de la calcita observada en las areniscas rojas (calcita I), esta calcita es localmente más abundante, presenta texturas poikilotópica y de clastos flotantes como resultado de una intensa disolución previa a su precipitación, y además contiene inclusiones fluidas con hidrocarburos que señalan la circulación de fluidos orgánicos durante su precipitación. Esta calcita tardía suele presentarse en forma de tubos y concreciones de tamaño variable entre 1 y 5 m de longitud y 20 a 100 cm de espesor y con abundantes impregnaciones de bitumen (Figuras 4C; 7H). Los tubos presentan una orientación preferencial NNE-SSO que coincide con la orientación secundaria de las fallas y diaclasas (Figura 4B).

En la Fm Huincul, las areniscas e incluso las pelitas en el contacto con las areniscas están decoloradas (Figura 4G). Las areniscas blancas se caracterizan por la ausencia de los coatings de hematita, sin embargo relictos de hematita han sido preservados en el contacto entre clastos y precipitados autigénicos (p. ej. crecimientos secundarios de cuarzo). Los feldespatos y los fragmentos volcánicos están parcialmente disueltos y alterados a esmectita, de tipo montmorillonita, que también se encuentra como coatings de los clastos detríticos. No se observaron los crecimientos secundarios de albita tan comunes en las areniscas alteradas de la Fm Huincul en el área del DCh, pero contiene analcima precipitada tempranamente (durante el enrojecimiento de la roca, equivalente a la analcima de la Fm Candeleros) parcialmente disuelta y reemplazada por calcita poikilotópica.

Dada la intensa alteración de las areniscas de la Fm Huincul y la ausencia de la facies roja,

no hay facies intermedias. Sin embargo, cuando en las areniscas decoloradas predomina el interestratificado clorita-esmectita en lugar de esmectita, las areniscas cambian localmente su coloración a marrón, como la facies marrón del DCh. Se han observado cristales de pirita relícticos en los poros de las areniscas decoloradas, dado que la mayoría se encuentra alterado a óxidos e hidróxidos de hierro que forman halos concéntricos ferruginosos. También contienen tubos y concreciones carbonáticas con formas semi-esféricas cuyos diámetros varían entre 10 y 50 cm e impregnaciones de bitumen que indican la circulación previa de hidrocarburos líquidos (Littke *et al.*, 1996).

En la Fm Portezuelo del área Barda González, las areniscas están decoloradas (Figura 5D), carecen de coatings de hematita y los clastos de feldespatos y fragmentos volcánicos están parcialmente disueltos. Se observaron *coatings* de montmorillonita con cristales de pirita de grano fino. La disolución de clastos y cementos se refleja en el desarrollo de porosidad secundaria inter- e intragranular (~15 %). Contienen impregnaciones de bitumen en las superficies de los clastos y como relleno de fracturas. Hay analcima tardía en los poros (Pons *et al.*, en prensa).

En los paquetes de areniscas blancas se identificaron sectores de coloraciones gris y amarillenta que contienen intensa cementación carbonática. Estas areniscas presentan textura de grano flotante y abundantes impregnaciones de bitumen (Figura 6G). El análisis microscópico permitió identificar 5 estadios de precipitación carbonática: 1) calcita micrítica (calcita I) no luminiscente que cementa poros y reemplaza clastos, *mudchips* y estructuras biogénicas, 2) anillos de calcita isopáquica (calcita II) de hábito prismático con pobre a nula luminiscencia, 3) calcita barroca (calcita III) de grano grueso luminiscente; las calcitas II y III suelen presentar zonación oscilatoria de luminiscencia clara (calcita III) y luminiscencia oscura (calcita II) y ambas contienen inclusiones fluidas orgánicas con fluorescencia verdosa, 4) calcita límpida (calcita IV), con luminiscencia homogénea e inclusiones fluidas orgánicas con fluorescencia débil de color azul corta a los carbonatos previos y 5) calcita (calcita V) no luminiscente rellena venillas que cortan a los carbonatos previos (Pons *et al.*, en prensa).

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los contrastantes cambios en la coloración de las areniscas rojas observados en las áreas de estudio se correlacionan con el desarrollo de dos episodios diagenéticos, el primero que incluye el enrojecimiento e inicio en la historia de soterramiento de las areniscas y un segundo evento que abarca el ingreso de fluidos reductores y la decoloración de las areniscas rojas. A escala regional es posible observar que los sectores decolorados corresponden a los estratos con mayor porosidad y permeabilidad y, dentro de un estrato o secuencia de estratos de condiciones petrofísicas homogéneas, los sectores decolorados se disponen por encima de los estratos rojos. Este patrón

general de decoloración responde a los principios fundamentales de la migración de fluidos que, en primera instancia, ocupan los sectores más permeables. En este caso -debido a su menor densidad cuando migran dentro de una secuencia homogénea- se estratifican por encima de los fluidos acuosos. La ubicua presencia de impregnaciones de bitumen, tubos de hidrocarburos e inclusiones fluidas orgánicas en los minerales autigénicos en los estratos que están decolorados, es una clara evidencia de que los hidrocarburos fueron los fluidos reductores que generaron la decoloración de estas areniscas rojas. Este proceso de decoloración denominado “*bleaching*” es el resultado de la interacción fluido-roca. Dependiendo de los minerales diagenéticos previamente formados y de la composición de los fluidos que circularon en la roca durante la alteración, la composición mineralógica final varía de una formación a otra e incluso en una misma formación que se encuentra en distintos sectores de la cuenca.

Si bien las rocas sedimentarias del Grupo Neuquén fueron depositadas bajo condiciones oxidantes, como lo demuestran los coatings de hematita (Brown 2005), el resto de sus minerales autigénicos tempranos señalan condiciones específicas del ambiente en el cual se formaron. Por ejemplo, la Fm Candeleros cuya sedimentación ocurrió en un ambiente continental árido y alcalino tiene corrensita, mientras que la Fm Huincul, depositada en un ambiente continental más húmedo y más ácido, presenta caolinita en sus poros.

Los hidrocarburos migraron con aguas de formación que llevan disueltas otras especies como ácidos orgánicos, metano y CO_2 (Carothers y Kharaka 1978). Particularmente los ácidos orgánicos tienen una gran capacidad de disolución de los carbonatos, aluminosilicatos e incluso del cuarzo (Surdam *et al.*, 1984, 1989), incrementando la porosidad de la roca y la interacción fluido-roca. Los poros sobredimensionados de las areniscas alteradas analizadas en este trabajo, son evidencias de la intensa destrucción de los clastos lábiles. Estas disoluciones pueden generarse a temperaturas menores de 80°C , donde los ácidos orgánicos se forman como resultado de la biodegradación de los hidrocarburos (Larter *et al.*, 2006), o bien entre los $80\text{-}120^\circ\text{C}$ donde los ácidos orgánicos pueden migrar con los hidrocarburos, siendo este rango de temperaturas el que favorece su máxima concentración (Carothers y Kharaka 1978).

El fluido reductor reaccionó con los minerales y las aguas de formación oxidantes hospedados en las areniscas rojas, dando lugar a reacciones redox con la hematita, que liberaron el Fe^{3+} y lo redujeron a $\text{Fe}^{2+}_{\text{aq}}$ que fue removido o bien precipitó como pirita; en cualquiera de los dos casos la reducción del hierro generó la decoloración de la arenisca (Walker 1976; Zielinski *et al.*, 1983; Brown 2005). Además de hematita, carbonatos y sulfatos autigénicos, feldespatos y fragmentos volcánicos fueron disueltos dando lugar a un notorio incremento de la porosidad durante el episodio de alteración. Por otro lado, la gran disponibilidad de iones en solución favoreció la precipitación de nuevos minerales autigénicos como esmectita (montmorillonita) e interestratificado clorita-esmectita o illita-esmectita, hematita secundaria, cuarzo microgranular, pirita y calcita poikilotópica.

La disolución y reacciones redox generaron CO_2 como subproducto aumentando la P_{CO_2} que favoreció la precipitación de carbonatos tardíos (Surdam *et al.*, 1984, 1989). En el área de Barda González, el arribo de los hidrocarburos habría generado varios eventos de precipitación de calcita (calcita isopáquica (II) y calcita barroca (III)). Las inclusiones fluidas orgánicas con fluorescencia amarilla en estas calcitas, indican que es el mismo hidrocarburo el que estuvo presente al momento de precipitación de estos carbonatos. Un nuevo pulso de hidrocarburos habría generado disolución de estos carbonatos y clastos y la precipitación de la calcita IV. El cese de la circulación hidrocarburos en el sistema habría ocurrido durante la precipitación de la calcita V que carece de inclusiones fluidas orgánicas. La distribución de calcita en las areniscas blancas del Cerro Granito muestra zonas con altas concentraciones de este mineral. En algunos casos forman tubos de carbonatos de varios metros de longitud que se asemejan a tubos de carbonatos observados en otros reservorios de hidrocarburos donde se asocia su origen a la localización de zonas de falla (p. ej. Entrada Sandstone, Utah; Garden *et al.*, 2001). Estos autores sugieren que durante el fracturamiento, la presión debe haber caído notablemente liberando el CO_2 de la solución, el cual habría migrado hacia arriba y generado la precipitación local de calcita (Garden *et al.*, 2001). La orientación NNE-SSO de los tubos de carbonatos de la Fm Candeleros coincide con una de las orientaciones principales de las fallas y diaclasas del área. En consecuencia, el origen de las concreciones y tubos de las formaciones Candeleros y Huincul parece estar relacionado a la migración de hidrocarburos a través de fallas y a la exsolución del CO_2 (Garden *et al.*, 2001).

En el DCh, donde el Grupo Neuquén aflora a lo largo de la estructura anticlinal de 70 km de extensión, los hidrocarburos pudieron migrar lateralmente dentro de la Fm Huincul, dando lugar al desarrollo de un sistema redox de al menos 30 km de largo x 12 km de ancho caracterizado por las areniscas rojas en el compartimiento oxidante, las areniscas blancas en el compartimiento reductor y las areniscas grises y marrones que se disponen en el contacto entre las anteriores determinado el frente redox del sistema. Las areniscas grises, que representan la facies más abundante y común del frente redox, contienen abundante montmorillonita $\pm$ interestratificado clorita-montmorillonita $\pm$ cuarzo microgranular $\pm$ hematita secundaria. Cuando predomina la clorita-montmorillonita da lugar al desarrollo de las areniscas marrones que indican condiciones más reductoras en este frente. La presencia de V y Cu en los minerales identificados en el frente redox, acentúa el rol del frente redox en la precipitación de estos elementos metálicos, cuya especiación es muy sensible a las condiciones de Eh.

En la DH, el desarrollo del sistema redox no es tan claro. En este caso, los afloramientos del Grupo Neuquén son más discontinuos, respondiendo al complejo sistema de fallas. De este modo las fallas han sido el principal conducto de migración de los fluidos, la alteración es más penetrante, en algunos casos los óxidos de hierro apenas se preservan en la base de las secuencias decoloradas y en los estratos pelíticos, como en el Cerro Granito, mientras que en otros sectores como en Barda González, los óxidos de hierro han sido preservados sólo en los estratos pelíticos.

En estas zonas de la DH, montmorillonita e interestratificado clorita-montmorillonita con piritita y calcita son los minerales precipitados durante la decoloración de los estratos rojos, sin que se haya preservado el frente redox de la magnitud observada en el DCH.

Las formaciones Candeleros, Huincul y Portezuelo se depositaron durante el Cretácico Superior como respuesta al evento compresional relacionado al crecimiento de la faja plegada y corrida de los Andes hacia el oeste. Durante el Terciario, probablemente el Mioceno, la deformación se tradujo en una reactivación de estructuras antiguas que plegó y fracturó a las rocas del Grupo Neuquén, favoreciendo la migración de hidrocarburos desde los reservorios más profundos. Durante las etapas de compresión posteriores, la denudación de las limoarcilitas de las formaciones Cerro Lisandro y Plottier que eran el sello regional para las areniscas, dio lugar a la exhumación y la exposición de Huincul, Portezuelo y en menor medida Candeleros, liberando los hidrocarburos.

La contribución más importante de este estudio es el reconocimiento de que una amplia variedad de alteraciones, además de la disolución de hematita, se produjo debido a la migración de fluidos reductores (hidrocarburos, ácidos orgánicos) a través del Grupo Neuquén. En las unidades que tienen hematita como cemento temprano es fácil documentar la migración de tales fluidos. Sin embargo, si la hematita no está presente, entonces la migración de los fluidos reductores podría fácilmente ser pasada por alto. Las alteraciones que se documentan en este estudio proporcionan un medio alternativo para demostrar la migración de fluidos reductores a través de una unidad en estos casos.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue financiada los proyectos PICT 2010-2608 del FONCYT, PIP-1083 CONICET, PI 04/I167 de la U.N. del Comahue y dos becas del Erasmus Mundus Program desarrolladas en la Universidad de Poitiers, Francia. Los autores agradecen a la empresa minera Orión del Sur S.A. por el acceso a las áreas de estudio, a Eduardo Bohuier y a Ariel Testi por sus colaboraciones en las tareas de campo.

REFERENCIAS CITADAS

- | | |
|---|---|
| Beitler, B., W. T. Parry y M. A. Chan, 2003. Bleaching of Jurassic Navajo Sandstone on Colorado Plateau Laramide highs: Evidence of exhumed hydrocarbon supergiants?, <i>Geology</i> , v. 31, p. 1041-1044. | Beitler, B., W.T., Parry y M.A.Chan, 2005. Fingerprints of fluid flow: Chemical diagenetic history of the Jurassic Navajo Sandstone, southern Utah: <i>Journal of Sedimentary Research</i> , v. 75, p. 457-561. |
|---|---|

- Bensing, J.P., P. S. Mozley y N. W. Dunbar, 2005. Importance of clay in iron transport and sediment reddening: evidence from reduction features of the Abo Formation, New Mexico, U.S.A., *Journal of Sedimentary Research*, v. 75, p. 562-571.
- Brown, A. C., 2005. Refinements for footwall red-bed diagenesis in the sediment hosted stratiform copper deposits model: *Economic Geology*, v. 100, p. 765-771.
- Carothers, W.W. y Y.K., Kharaka, 1978, Aliphatic acid anions in oil-field waters- Implications for origin of natural gas, *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, v. 62, p. 2441-2453.
- Cazau, L. y M. A. Uliana, 1973. El Cretácico superior continental de la Cuenca Neuquina, V Congreso Geológico Argentino, v. 3, p. 131-163, Argentina.
- Chan, M. A., W. T. Parry y J. R. Bowman, 2000. Diagenetic Hematite and Manganese Oxides and Fault-Related Fluid Flow in Jurassic Sandstones, Southeastern Utah, *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, v. 84, p. 1281-1310.
- Cristallini, E.O., J. M. Martínez, E. Sanchez, S. Periale Gómez y A. Loncarich, 2005. Evaluación estructural del bloque Bandurria (Provincia del Neuquén, Argentina), YPF, (unpublished), p. 1-73.
- De Ferrariis, C., 1968. El Cretácico del norte de la Patagonia, 3° Jornadas Geológicas Argentinas, v. 1, p. 121-144, Argentina.
- Dickinson, W.R., L.S., Beard, G.R., Brakenridge, J.L., Erjavec, R.C., Ferguson, K.F., Inman, R.A., Knepp, F.A., Lindberg, y P.T., Ryberg, 1983. Provenance of North American Phanerozoic sandstones in relation to tectonic setting, *Geological Society of America Bulletin*, v. 94, p. 222-235.
- Folk, R. L., P. B. Andrews y D. W. Lewis, 1970, Detrital sedimentary rock classification and nomenclature for use in New Zeland, *New Zeland Journal of Geology and Geophysics*, v. 13, p. 937-968.
- Garden, I.R., S. C. Guscott, S. D. Burley, K. A. Foxford, J. J. Walsh, y J. Marshall, 2001. An exhumed palaeo-hydrocarbon migration fairway in a faulted carrier system, Entrada Sandstone of SE Utah, USA, *Geofluids*, v. 1, p. 195-213.
- Garrido, A. C., 2010, Estratigrafía del Grupo Neuquén, Cretácico Superior de la Cuenca Neuquina (Argentina): nueva propuesta de ordenamiento litoestratigráfico. *Rev. Mus. Argentino Cienc. Nat*, ns 12(2): 121-177. Buenos Aires
- Hilse, U., A. Goepel, D. Pudlo, K. Heide y R. Gaupp, 2010. Characterization of CO₂-induced (?) bleaching phenomena in Germanred bed sediments by combined geochemical and evolved gas analysis, p.1684, EGU General Assembly 2010, Vienna, Austria,
- Larter, S., H. Huang, J. Adams, B. Bennet, O. Jökannala, T. Oldenburg, M. Jones, I. Head, C. Riediger, C. y M. Fowler, 2006. The controls on the composition of biodegraded oils in the deep subsurface: Part II-Geological controls on subsurface biodegradation fluxes and constraints on reservoir-fluid property prediction, *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, v. 90, p. 921-938.
- Leanza, H. y C. Hugo, 1993. Hoja Geológica Picún Leufú. Boletín n° 218, Subsecretaría de Minería de la Nación.
- Littke, R., F. J. Brauckmann, M. Radke y R. G. Schaefer, 1996. Solid bitumen in Rotliegend gas reservoirs in northern Germany: implications for their thermal and filling history, *Zentralblatt für Geologie und Paläontologie*, Teil 1, v. 11, p. 1275-1292.
- Maretto, H. y F. Pángaro, 2005. Edad de formación de algunas de las grandes estructuras del engolfamiento de la Cuenca Neuquina: Actividad tec-

- tónica durante la depositación de la Fm Quintuco, VI Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Trabajos Técnicos, IAPG, 11 p., Mar del Plata, Argentina.
- Mosquera, A., y V. A. Ramos, 2006. Intraplate deformation in the Neuquén Embayment, en S. M. Kay y V. A. Ramos (eds.), *Evolution of an Andean margin: A tectonic and magmatic view from the Andes to the Neuquén Basin (35°-39°S lat)*, Geological Society of America, Special Paper 407, p. 97-123.
- Parry, W. T., M. A. Chan y B. Beitler, 2004. Chemical bleaching indicates episodes of fluid flow in deformation bands in sandstone, *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, v. 88, N°2, p. 175-191.
- Parry, W. T., M. A. Chan y B. P. Nash, 2009. Diagenetic characteristics of the Jurassic Navajo Sandstone in the Covenant oil field, central Utah thrust belt, *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, v. 93, N°8, p. 1039-1061.
- Pons, J., A., Rainoldi, M. Franchini, A. Giusiano, N. Cesaretti, D. Beaufort, P. Patrier, y A. Impicini, en prensa. Montmorillonite and multi-stage calcite crystallization related to hydrocarbon circulation in Cretaceous red beds of the Barda González area, Neuquén Basin, Argentina. *American Association of Petroleum Geologists*, en prensa.
- Rainoldi, A., M. Franchini, D. Beaufort, P. Patrier, A. Giusiano, A. Impicini y M. J. Pons, 2014. Large-scale bleaching of red beds related to upward migration of hydrocarbons: Los Chihuidos High, Neuquén Basin, Argentina, *Journal of Sedimentary Research*, 2014, v. 84, p. 373-393. DOI: <http://dx.doi.org/10.2110/jsr.2014.31>
- Ramos, V. A., 1981. Descripción geológica de la hoja 33c Los Chihuidos Norte, Provincia de Neuquén: Servicio Geológico Nacional, Boletín, v. 182, p. 1-103.
- Sánchez, M. L., J. O. Calvo, y S. Heredia, 2005. Paleoambientes de sedimentación del tramosuperior de la Formación Portezuelo, Grupo Neuquén (Cretácico Superior), Los Barreales, provincia del Neuquén, *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, v. 60, no.1, p. 142-158.
- Schöner, R. y R. Gaupp, 2005. Contrasting red bed diagenesis: the southern and northern margin of the Central European Basin, *International Journal of Earth Sciences*, v. 94, p. 897-916.
- Schumacher, D., 1996. Hydrocarbon-induced alteration of soils and sediments, en D. Schumacher y M. A. Abrams (eds.), *Hydrocarbon Migration and its Near-Surface Expression*, American Association of Petroleum Geologists Memoir 66, p. 71-89.
- Surdam, R.C., S. W. Boese y L. J. Crossey, 1984. The chemistry of secondary porosity, en O. Mc Donald y R. Surdam (eds.), *Clastic Diagenesis*, American Association of Petroleum Geologists Memoir 37, p.127-149.
- Surdam, R.C., L.J. Crossey, E.S. Hagen y H.P. Heasler, 1989. Organic-inorganic interactions and sandstone diagenesis, *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, v. 73, p. 1-32.
- Surdam, R.C., Z. S. Jiao, y D. B. Mac Gowan, 1993. Redox reactions involving hydrocarbons and mineral oxidants: A mechanism for significant porosity enhancement in sandstones, *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, v. 77, p. 1509-1518.
- Walker, T. R., 1976. Red beds in the western interior of the United States, U.S. Geological Survey Professional Paper 853, p. 49-56.

Wichmann, R., 1927. Sobre las facies lacustres Senoniana de los estratos con dinosaurios y su fauna, Boletín de la Academia Nacional de Ciencias 30, p.383-406.

Zielinski, R. A., S. Bloch y T. R. Walker, 1983. The mobility and distribution of heavy metals during the formation of first cycle red beds, Economic Geology, v. 78, p. 1574-1589.