

LA FORMACIÓN VACA MUERTA EN LA FAJA PLEGADA DE NEUQUÉN Y MENDOZA. PROCESOS QUE CONTROLARON SU MADUREZ

Ricardo Gómez Omil¹, Javier Caniggia¹, Pablo Borghi¹

1: Wintershall Energía S.A. ricardo.gomez-omil@wintershall.com,
javier.caniggia@wintershall.com, pablo.borghi@wintershall.com

Palabras clave: Fm Vaca Muerta, Faja Plegada, Madurez, Sinclinales Frontales

ABSTRACT

The Vaca Muerta Formation in the Neuquén and Mendoza Fold Belt. Processes controlling maturity
In this paper the petroleum system related to the Vaca Muerta Fm in the Neuquén and Mendoza fold and thrust belt is analyzed. The most important factors that determined and affected the maturation process of this significant source rock are closely related to the sedimentary facies distribution, the original geometry of the basin, the TOC, the Cretaceous subsidence and lastly, the Cretaceous and Tertiary compressive deformation. As a consequence of the interaction of these elements, six pods of this source rock that currently remain active have been defined. Their location coincides with the most relevant frontal synclines adjacent to the main basement anticlines: 1) Huantraico, 2) Chapúa, 3) Lululén – Quechu vil, 4) Ventana, 5) Malargüe and 6) Cuchilla de la Tristeza. The geological evolution of these areas determined different timing and degree of maturity in the Vaca Muerta Fm. On the other hand, the tectonic deformation and the consequent uplift and erosion of large areas located on top of the flanks of the largest basement anticlines turned active zones of hydrocarbon generation into inactive. Maturity in the southern pods of the study area was reached in the middle Cretaceous and in the northern ones in the Tertiary (Miocene). In some of the main kitchens, such as Huantraico, Lululén – Quechu vil and Cuchilla de la Tristeza, an important extension of the active pods below the main basement thrusts has been suggested.

INTRODUCCIÓN

La Cuenca Neuquina localizada entre los 32° y 40° de latitud sur, con una extensión areal aproximada de 120.000 km² es una de las más importantes cuencas hidrocarburíferas de la República Argentina, pudiéndose encontrar a lo largo de su columna estratigráfica, cinco unidades generadoras, que en distinto orden de magnitud han aportado el desarrollo de acumulaciones comerciales de hidrocarburos. Considerando la cantidad de líquidos y gas generado se pueden ordenar de mayor a menor de la siguiente manera: Fm Vaca Muerta (Jurásico Superior), Fm Los Molles (Jurásico Inferior), Fm Agrio; Mb Inferior (Valanginiano Sup. - Hauteriviano Sup.) y Mb Superior (Hauteriviano Sup. - Barremiano Inf.), finalmente Precuyo (Triásico-Jurásico Inferior),

(Legarreta *et al.*, 2004).

Este trabajo se concentra sobre la roca madre más prolífica de la cuenca, la Fm Vaca Muerta, y particularmente dentro del ámbito de la faja plegada (Figura 1). Su mayor espesor alcanzaría en el sector suroccidental de la FPC (Faja Plegada y Corrida) los 1300 metros, sin discriminar las facies distales de la Fm Quintuco, con valores de COT (Carbono Orgánico Total) entre 2% y 8% y picos de hasta 10-12%. Existen variaciones importantes en el contenido de carbono or-

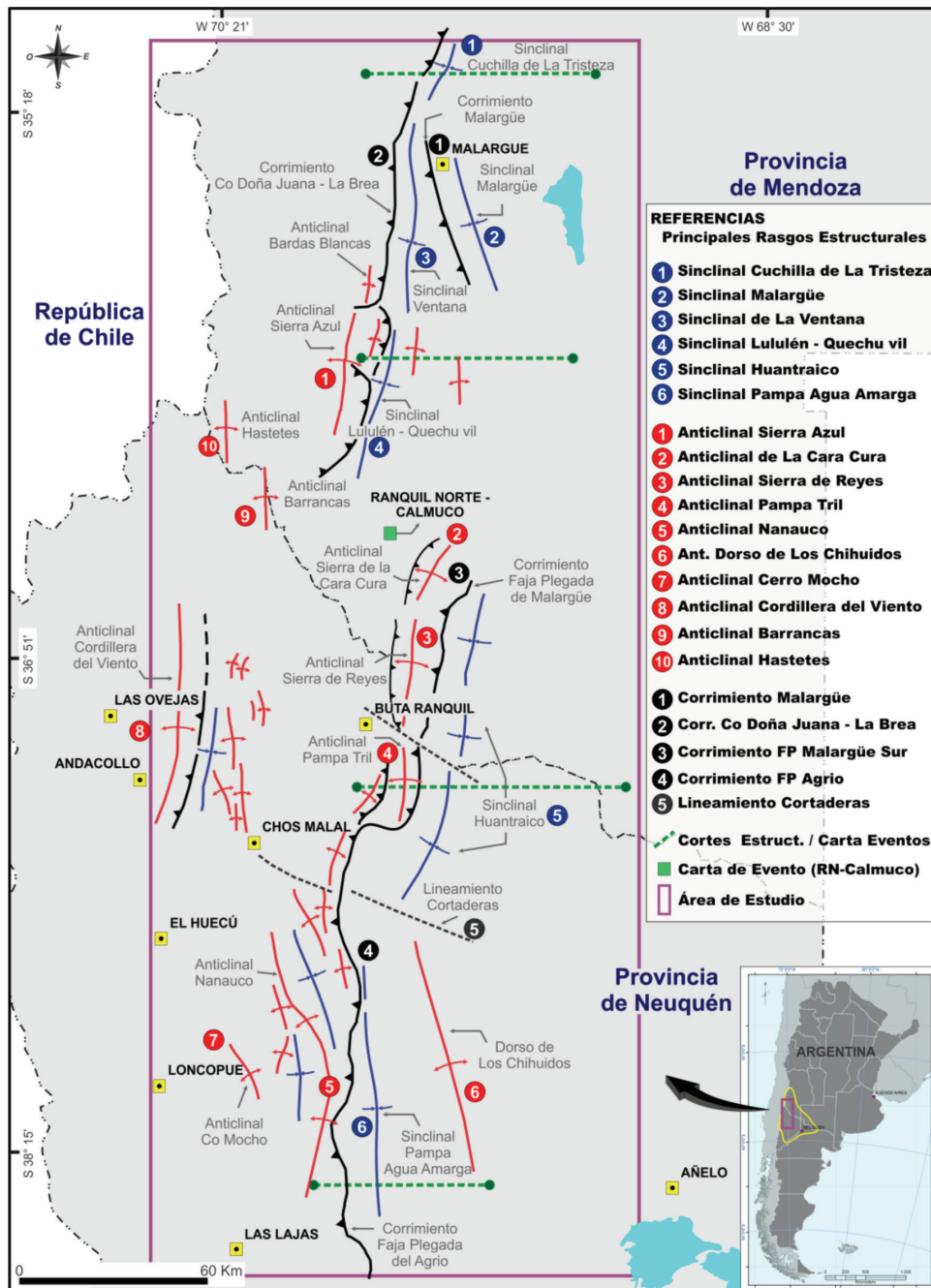


Figura 1. Mapa de ubicación del área de estudio, comprendiendo de norte a sur la faja plegada de Malargüe, Chos Malal y del Agrio. Provincias de Neuquén y Mendoza.

gánico en sentido vertical, asociándose aquellos valores mayores con ambientes sedimentarios más profundos, de centro de cuenca y talud, que en muchos casos coinciden con niveles de secciones condensadas, tal cual se comprobó en numerosos pozos perforados en el ámbito del engolfamiento neuquino y en secciones afloradas de la cuenca. De acuerdo a Legarreta *et al.*, 2004, se trata de un querógeno amorfo marino anóxico de tipo II con escasa a nula participación de elementos terrestres.

Numerosos trabajos estratigráficos, estructurales, geoquímicos y relacionados al sistema petrolero del Grupo Mendoza fueron efectuados con un enfoque regional en esta extensa cuenca. En particular, el ámbito de la FPC de Neuquén y Mendoza, que comprende la Faja Plegada del Agrio, de Chos Malal y de Malargüe, fue estudiado, en los últimos 40 años, no solo desde el punto de vista estructural sino también enfocado en sus diferentes sistemas petroleros. (Uliana y Legarreta, 1993, Urien y Zambrano, 1994, Cruz *et al.*, 1996, Cruz *et al.*, 1998, Villar *et al.*, 1998, Uliana *et al.*, 1999b, Legarreta *et al.*, 2003, Villar *et al.*, 2005 y Giampaoli *et al.*, 2005). Los aportes brindados por distintos investigadores trazaron caminos de razonamiento valiosos que contemplan, no sólo la publicación de datos “duros”, sino también modelos de madurez, deformación y *timing*.

En un intento de explicar los éxitos y fracasos exploratorios como también el de identificar las zonas con potencial remanente, se plantea la necesidad de entender el funcionamiento de los sistemas petroleros presentes en la FPC de este sector de la cuenca.

Se pretende con este trabajo analizar e integrar los factores principales que afectaron y controlaron el sistema petrolero relacionado con la Fm Vaca Muerta en la FPC al norte de Neuquén y sur de Mendoza. A continuación se mencionan algunos de ellos:

1. La distribución de facies y espesores de la Fm Vaca Muerta y su relación espacial con la orientación de la FPC.
2. La subsidencia Cretácica diferencial a lo largo de la Faja Plegada.
3. La deformación compresiva cretácica y terciaria polifásica, con sus efectos asociados de subsidencia por carga tectónica localizada, levantamiento y deformación estructural, erosión parcial o total de la columna sedimentaria, enfriamiento lento de las rocas madre y la preservación de los sellos luego de la deformación.
4. El efecto térmico vinculado con intrusivos de edad Mioceno y de carácter localizado.

ANTECEDENTES PETROLEROS

La región analizada corresponde al llamado “Distrito Puesto Rojas – El Portón” definido por Legarreta *et al.*, 2008, y que fuera intensamente explorado, principalmente por YPF, en busca

de trampas estructurales durante las décadas del 70 y 80. En su mayoría, los pozos exploratorios fueron ubicados utilizando geología de superficie, modelos estructurales, sísmica 2D de regular a mala calidad y en los últimos años con sísmica 3D, que fue utilizada en su mayoría en la etapa de desarrollo de los yacimientos.

Como resultado de la actividad exploratoria se han descubierto muy pocos yacimientos de magnitud considerable en esta comarca, encontrándose principalmente asociados a la presencia de excelentes rocas reservorio de edad Cretácico (Mb Troncoso Inferior de la Fm Huitrín y Mb. Avilé de la Fm Agrio) y a posiciones estructurales específicas, en estrecha relación con sinclinales ubicados al frente de las estructuras mayores de basamento, coincidiendo con algunas de las denominadas zonas triangulares (yacimientos Filo Morado, El Portón, Chihuido de la Salina). En estos casos específicos se comprobó la existencia de una sobrepresión significativa asociada con la Fm Vaca Muerta y en ocasiones en niveles de la Fm Agrio.

Con la excepción del tren estructural del yacimiento El Portón y Puesto Rojas - Cerro Mollar, el resto de los campos hidrocarburíferos descubiertos hasta la fecha, en este ambiente geológico, son de talla pequeña (yacimientos Puntilla de Huincán, El Manzano, Cerro Doña Juana, Vega Grande, Agua Botada, La Brea, etc.); registrándose además significativas manifestaciones de gas y petróleo en varios de los sondeos perforados.

Los análisis post-drilling de los pozos exploratorios estériles de esta región, en la mayoría de los casos, concluyeron que la principal causa del fracaso de los prospectos resultó de la ausencia de reservorios de calidad. Por otro lado, se ha comprobado la existencia de niveles fracturados capaces de almacenar hidrocarburos en intervalos carbonáticos de las formaciones Vaca Muerta, Agrio, Chachao y La Manga, como así también en intrusivos terciarios.

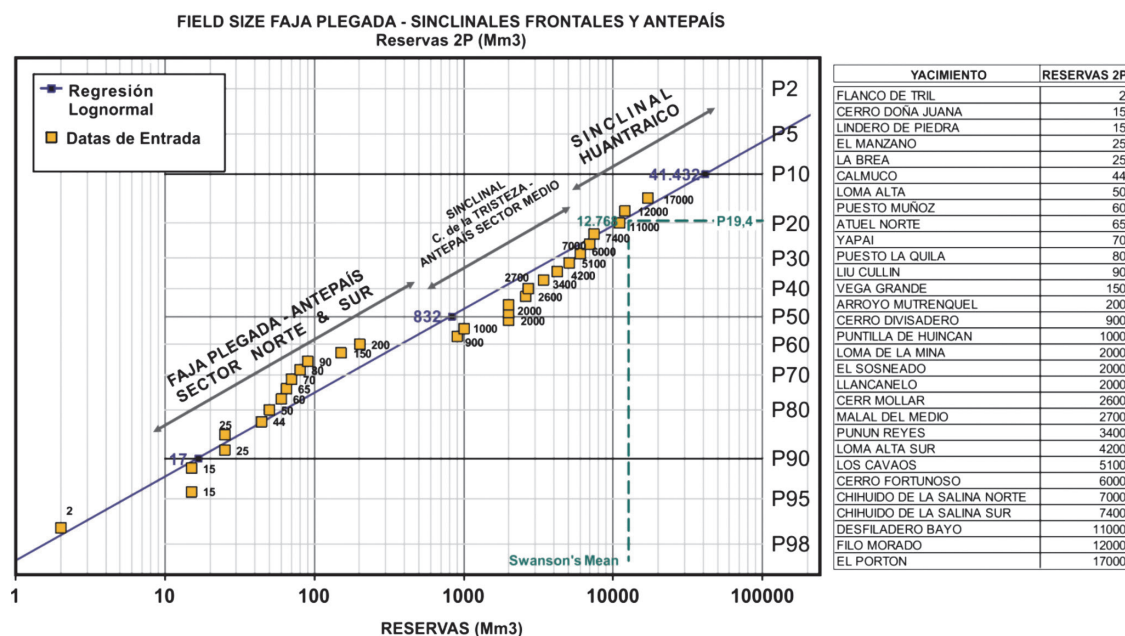


Figura 2. "Field size distribution", yacimientos ubicados dentro del ámbito de la FPC.

La Figura 2, muestra la distribución de yacimientos de la comarca, ordenados por su tamaño y posición dentro de la FPC. La información proviene de IHS y de la Secretaria de Energía de la Nación.

LA FORMACIÓN VACA MUERTA EN EL ÁMBITO DE LA FAJA PLEGADA Y CORRIDA

La Fm Vaca Muerta, con una amplia extensión dentro de la cuenca Neuquina, se compone principalmente de pelitas negras y margas y se interpretan como las facies distales y profundas de una conjunto de progradaciones carbonáticas y/o mixtas que se establecieron en la cuenca entre el Tithoniano temprano y el Valanginiano temprano (Mitchum y Uliana, 1985, Legarreta y Uliana, 1991, Legarreta *et al.*, 1993, Kietzmann, 2007).

Con el objetivo de comprender su desarrollo y distribución en el área de estudio, se confeccionó un mapa isopáquico de dicha unidad, que fue construido a partir de datos de sondeos, afloramientos, interpretación de registros sísmicos y secciones estratigráficas y estructurales publicadas.

En la porción suroeste del plano (Figura 3a), se define claramente un depocentro con un espesor que alcanzaría los 1300 m (Quintuco - Vaca Muerta) y que coincide con la prolongación del eje de máxima subsidencia del engolfamiento neuquino. Estos espesores pueden estar afectados por repeticiones tectónicas a causa de la deformación imperante en la región. En sentido noreste,

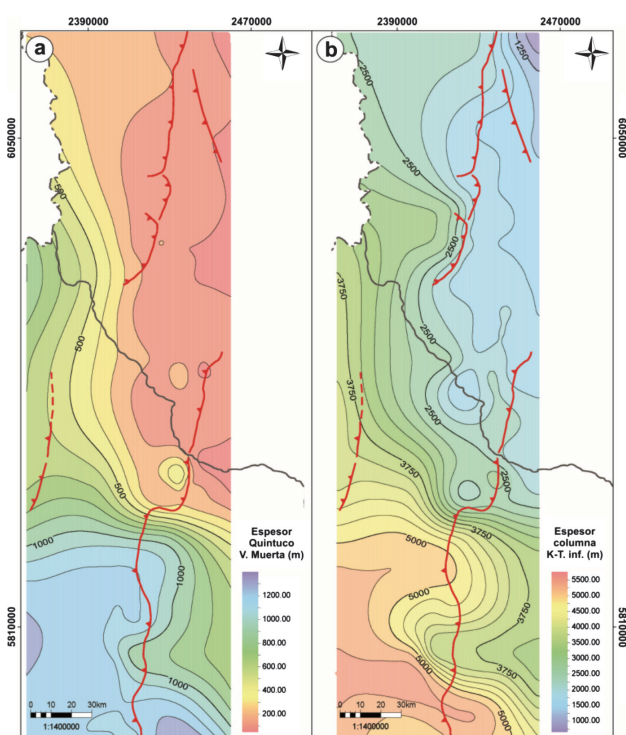


Figura 3a y b. 3a (izq.) Mapa isopáquico Fm Vaca Muerta. Nótese que en la porción SO no se discrimina en el plano las facies distales de Quintuco. 3b (der.) Mapa de espesor de la columna sedimentaria Cretácica-Terciaria inf

en cambio, el espesor disminuye gradualmente hasta la Sierra del Carrizalito, donde ya no está presente la unidad en sus facies pelíticas-margosas predominantes y en su lugar se presentan secuencias carbonáticas y arenosas depositadas en posiciones proximales (Fm Lindero de Piedra), sin condiciones para generar hidrocarburos.

Se puede observar que la FPC se dispone en dirección oblicua a las curvas isópacas y a la distribución regional de las facies; es decir, que avanza hacia el norte sobre sedimentitas cada vez más pobres en términos pelíticos bituminosos, por lo que las condiciones serán menos favorables para la generación a pesar de la carga litostática local asociada a los frentes de deformación. Lo mismo ocurre con respecto al resto de la columna estratigráfica jurásica y cretácica.

MADUREZ DE LA FM VACA MUERTA

Los trabajos de Legarreta *et al.*, 2003, Legarreta *et al.*, 2004 y Legarreta *et al.*, 2008, fueron un aporte fundamental para el entendimiento regional de la estratigrafía, características geoquímicas y distribución de los índices de madurez de la Fm Vaca Muerta en todo el ámbito de la Cuenca Neuquina. La integración de este conocimiento con las investigaciones propias y de numerosos autores en el campo de la geología estructural dentro del ámbito de la FPC, permite demostrar la íntima y crítica relación existente entre la evolución tectono-sedimentaria Cretácica-Terciaria y la evolución de la madurez térmica de la roca.

Se definen dos etapas que afectaron y controlaron la madurez de Vaca Muerta en el tiempo, la primera relacionada con la subsidencia cretácica y la segunda etapa vinculada con la deformación Andina, cretácica y terciaria.

Etapas de subsidencia cretácica:

En este período, la Cuenca Neuquina estuvo afectada por subsidencia térmica de la etapa de cuenca de retroarco. Para entender el soterramiento total al que se sometieron las sedimentitas tithonianas se construyó en el sector occidental de la cuenca, coincidente con la FPC, un mapa isopáquico regional de la columna involucrada por encima de la unidad en estudio hasta el Terciario inferior. En el mismo se define un importante depocentro que permite comprender el efecto producido por los procesos de subsidencia y carga litostática principalmente cretácica sobre la Fm Vaca Muerta (Figura 3b). Esta máxima depresión se desarrolló hacia el suroeste, en concordancia con la Fosa de Chos Malal y la Faja Plegada del Agrio, y en donde el soterramiento de esta unidad, medido a la base de la misma, habría alcanzado los 5000 metros de profundidad. Hacia el norte, en cambio, el soterramiento disminuye claramente, llegando tan solo a los 1000

metros en la zona de la Cuchilla de la Tristeza. Resulta evidente que esta enorme variación de carga litostática jugó un papel fundamental en la evolución térmica de Vaca Muerta durante el Cretácico, lo cual implica importantes diferencias de carácter regional en el *timing* de generación, transformación, expulsión, y por supuesto en el tipo de hidrocarburo producidos durante esta etapa que tuvo una duración cercana a los 75-80 Ma para el sector sur-occidental del área involucrada en este trabajo.

Para analizar el efecto de la subsidencia Cretácica sobre la evolución térmica de la Fm Vaca Muerta se realizaron modelos de madurez 1D con la aplicación Trinity, se apeló al plano isopáquico regional de la columna sedimentaria cretácico-terciario inferior mencionada en el párrafo anterior (Figura 3b) y gradientes geotérmicos variables para calibrar los datos “duros” disponibles (temperatura de pirólisis, reflectancia de vitrinita y la gravedad API de petróleos). Adicionalmente se realizaron mapas de madurez (índice de reflectancia de vitrinita - Ro) (Figuras 4a y b), y planos de tasa de transformación (TR) al tope y base de la unidad en estudio (Figuras 5a y b). (Sigismondi y Ramos, 2009).

En resumen, se reconoce claramente una disminución en la madurez (Ro) y de la (TR) de sur a norte durante el Cretácico, como ya fuera señalado por Legarreta *et al.*, 2005. Cabe destacar que, ya al norte de la latitud de la Sierra de Cara Cura, dentro de la provincia de Mendoza, la (TR) estimada es muy baja, menor a un 20% para la base de la Fm Vaca Muerta. Por otro lado, la región al sur del lineamiento Cortaderas habría alcanzado ya la ventana de gas seco (Figura 7d – Sinclinal Agua Amarga) durante el Cretácico, debido a la gran subsidencia diferencial ocurrida durante este período de tiempo.

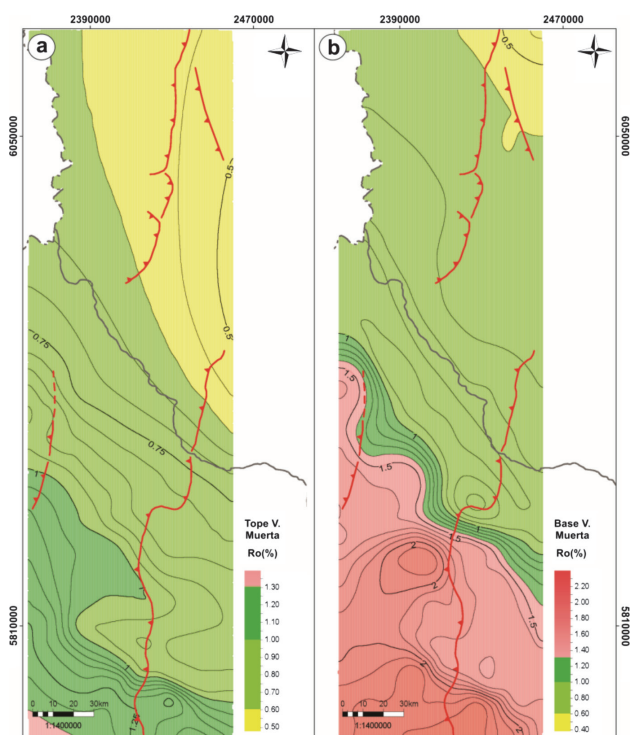


Figura 4a y b. 4a (izq.) Mapa de madurez térmica al tope de la Fm V. Muerta. 4b (der.) Plano de madurez referida a la base de la Fm V. Muerta.

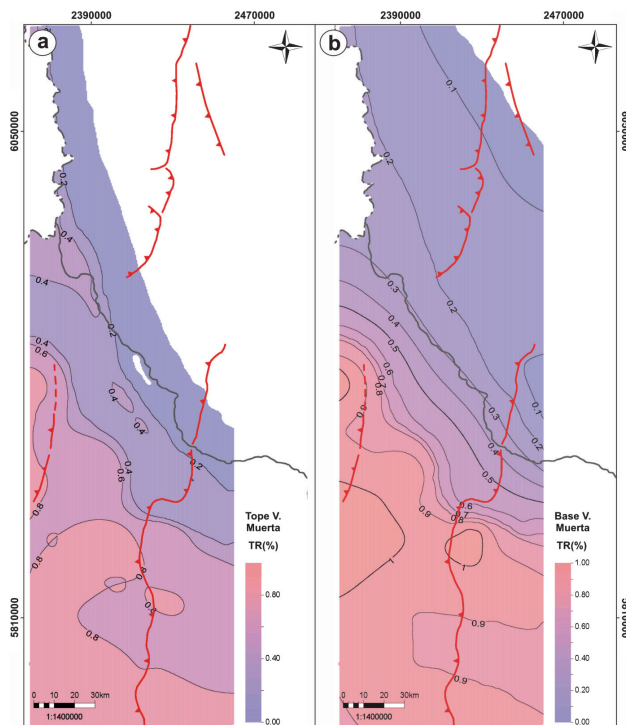


Figura 5a y b. 5a (izq.) Mapa de tasa de transformación al tope de la Fm Vaca Muerta. 5b (der.) Plano de índice de transformación referida a la base de la Fm Vaca Muerta.

Etapas de deformación Andina Cretácica y Terciaria:

La FPC de Neuquén y Mendoza en el sector que nos ocupa, habría iniciado su etapa compresiva a partir del Cretácico inferior (Aptiano), extendiéndose hasta el Mioceno superior hacia el borde septentrional de la cuenca. Se ha postulado que la edad de la deformación compresiva es más joven de sur a norte en coincidencia con un incremento del acortamiento y la frecuencia y magnitud de los pulsos tectónicos, dado que los más importantes se produjeron durante el Mioceno, asociado con las fases tectónicas Pehuenche y Quechua (Combina y Nullo, 2000, Cobbold y Rosello, 2003, Galarza *et al.*, 2009).

La configuración estructural actual es el resultado de la suma de los procesos de levantamiento, erosión y subsidencia asociados a las etapas compresivas mencionadas con anterioridad. Particularmente, dentro del ámbito andino analizado coexisten los dos estilos estructurales de deformación: tectónica de piel gruesa (*thick-skinned*) y deformación de piel fina (*thin-skinned*). Se han reconocido también niveles de despegue activos tanto en el Jurásico como en el Cretácico que han dado lugar a estructuras disarmónicas muy complejas; tal es el caso específico de algunas zonas triangulares como La Brea y Cerro Doña Juana, y otros casos más sencillos como la del sinclinal de Huantraico donde se encuentran los mayores yacimientos de hidrocarburos hasta hoy descubiertos asociados a la faja plegada (Chihuido de la Salina, El Portón, Filo Morado). Esta variable complejidad estructural genera a su vez una alta compartimentalización de los

niveles reservorio dificultando en algunos casos su explotación y a menudo también su precisa definición sísmica.

En la Figura 1 se señalan las principales estructuras anticlinales de la región, entre ellas se encuentran las de primer orden, con basamento involucrado en la deformación (Kozłowski *et al.*, 1997), las cuales se desarrollan con dimensiones kilométricas y orientación predominante norte-sur. Estas estructuras han sido interpretadas como el resultado de procesos de inversión tectónica (Manceda y Figueroa, 1993), o bien asociadas a fallas ciegas de bajo ángulo (Pampa Tril, Sierra de Reyes, etc.) o emergentes en superficie (Lululén, Sierra Azul, El Sosneado). Al frente de estas estructuras con basamento involucrado se desarrollan zonas de compleja deformación en la columna jurásica y cretácica (Płoszkiewicz 1987, Kozłowski *et al.*, 1998, Viñes, 1990, Zapata *et al.*, 1999, Fantín y Vitarella, 2011), definiendo “zonas triangulares” y “sinclinales frontales asociados”, que al quedar suficientemente soterrados se convirtieron en cocinas activas (PODS) claramente delimitadas, principalmente durante el Terciario (Mioceno).

Se definieron seis cocinas actualmente activas y que coinciden con los sinclinales frontales: 1) Huantraico, 2) Chapúa, 3) Lululén-Quechuvil, 4) Ventana, 5) Malargüe y 6) Cuchilla de la Tristeza.

En el dominio de la FPC, al norte del ámbito de influencia de la Dorsal de Huincul, se desarrolló un relleno de rocas clásticas y volcánicas sinorogénicas por encima de la columna sedimentaria mesozoica. La subsidencia de estas unidades alcanzó su mayor expresión durante el Mioceno debido a la instalación de la faja plegada y corrida asociada con una etapa de retroarco de la cuenca Neuquina. El espesor de este intervalo sedimentario se incrementa notablemente de sur a norte, variando desde aproximadamente 200 m al sur en el sinclinal Pampa de Agua Amarga, hasta más de 3500 m en el sinclinal Cuchilla de la Tristeza. Este contraste, se relacionaría con el incremento en el acortamiento y consecuente carga tectónica en dicha dirección posiblemente asociada con la disminución en el ángulo de subducción de la placa de Nazca durante el Mioceno superior (Folguera *et al.*, 2007).

Para ilustrar estos conceptos se construyeron sobre la base de datos de pozos, sísmica, magnetotelúrica y relevamientos de superficie, cuatro cortes estructurales esquemáticos, acompañados con modelados de madurez 1D (Figura 6). Las secciones que varían entre los 90 a 130 km de longitud involucran toda la columna sedimentaria y están orientadas de oeste a este entre el frente de deformación (leading edge) y el antepaís (Figura 6). Adicionalmente también se resaltan las ventanas actuales de generación de petróleo y gas para cada uno de los cortes aquí representados. Se puede apreciar, la geometría y las pendientes que se desarrollan entre el frente de deformación de la FPC y el antepaís, como también la disminución del espesor desde el sur hacia el norte de la columna sedimentaria cretácica y terciaria involucrada (Figura 6).

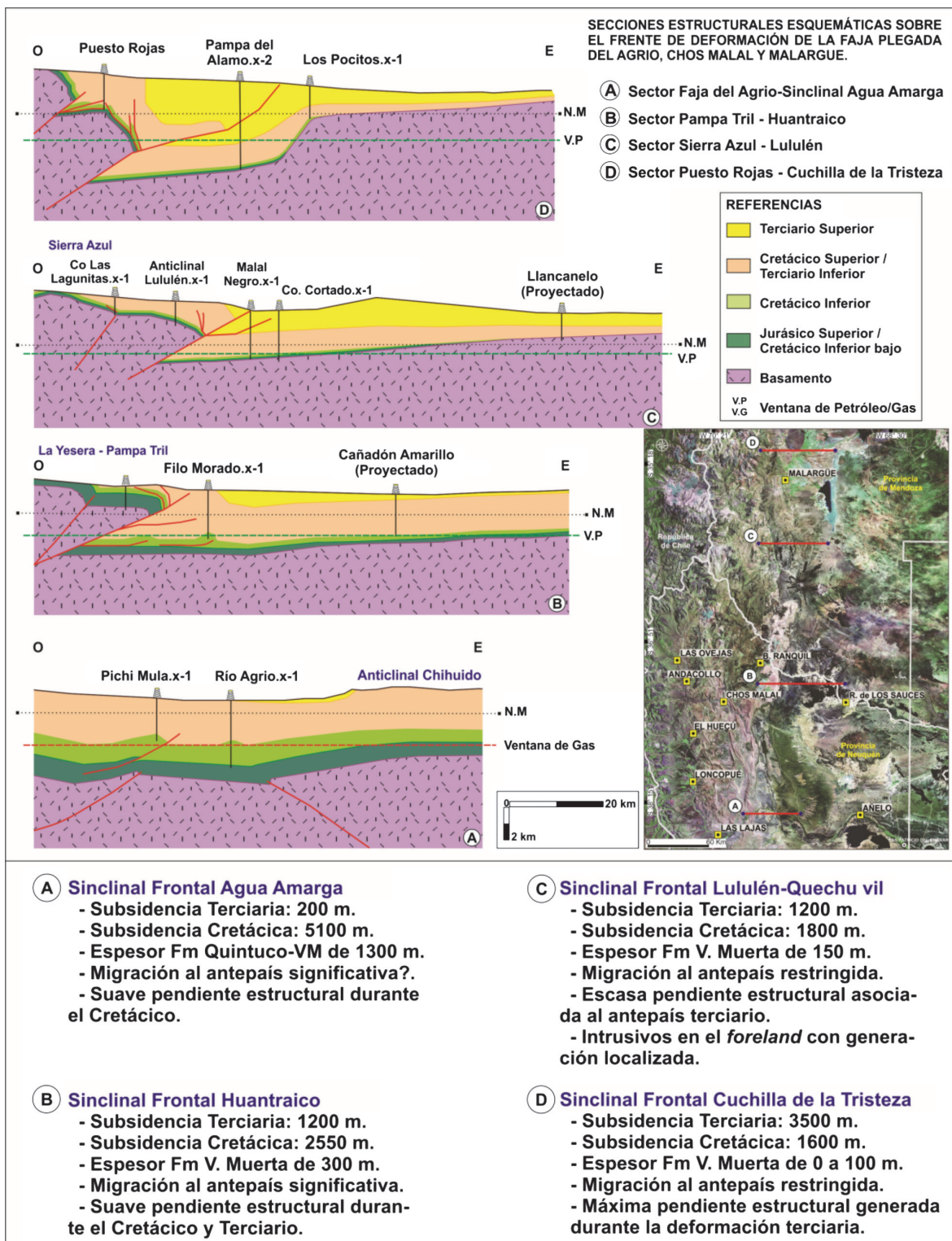


Figura 6. Secciones estructurales esquemáticas sobre el frente de deformación de la FPC neuquina - surmendocina y sus sinclinales frontales asociados.

EVOLUCIÓN TÉRMICA DE LAS COCINAS ACTIVAS EN LA FPC

Del análisis integrado entre mapas de espesores, temperatura, datos geoquímicos, tipos de hidrocarburos y gravedad API de los petróleos encontrados, es posible observar dentro del área de estudio el destacado papel que juega la deformación y sus efectos secundarios de carga litostática y subsidencia asociada como principal disparador para la generación de hidrocarburos. Este control en la distribución del tipo de fluido también se aprecia dentro de estructuras menores; por ejemplo, en un mismo sinclinal frontal como es el caso del sinclinal de Huantraico, donde la gravedad API del petróleo cambia de 42° en el sur (yacimiento Filo Morado) a 26° en el norte (yacimientos Barreales Colorados y Punún Reyes) en una distancia de tan solo 15 km, en este caso en particular debido principalmente a una mayor subsidencia cretácica hacia el sur.

Sobre el frente de los anticlinales La Yesera-Pampa Tril y hacia el sur se observa un incremento en los valores de madurez, pasando desde la generación de petróleo en el sinclinal de Huantraico hasta alcanzar la ventana de gas seco en el área de Agua Amarga (Figura 7c y d), estadio alcanzado durante el Cretácico vinculado a la depositación del Grupo Neuquén, Rayoso y Malargüe. Al norte del Río Colorado y hasta la región de la Cuchilla de la Tristeza, la Fm Vaca Muerta habría entrado en ventana de generación de petróleo recién en el Terciario (Figura 7a y b), debido a la subsidencia producida por la carga tectónica y la sedimentación sinorogénica (Mioceno) acaecida durante la orogenia Andina.

La evolución térmica de la Fm Vaca Muerta no puede entenderse como una sola y extensa cocina activa donde el índice de madurez disminuye gradualmente de sur a norte. Los resultados de los estudios estructurales efectuados, los análisis geoquímicos, los ensayos de pozos perforados, y los modelados de madurez nos indican que la historia de generación de esta roca madre en la FPC se debe analizar considerando simultáneamente la evolución sedimentaria y tectónica de la región; identificando aquellas áreas específicas dónde se alcanzaron las condiciones necesarias para la generación de hidrocarburos durante el Cretácico, de aquellas otras que se activaron en el Terciario para continuar con su análisis en la actualidad.

Es claro que el índice de reflectancia de la vitrinita (%Ro) es un indicador paleo-geotérmico irreversible, y que por lo tanto refleja las condiciones de temperatura máxima alcanzada por la roca, pero no registra la disminución térmica que podría suceder con posterioridad asociada con el levantamiento tectónico. Este punto advierte la necesidad de realizar un análisis cuidadoso de las cocinas que se mantienen activas actualmente y bajo qué condiciones, y de aquellas que se encuentran absolutamente inactivas debido al enfriamiento sufrido durante la etapa de deformación Andina, cuando dichas áreas son sometidas a levantamiento y erosión parcial.

Para revelar estos conceptos se definió regionalmente la distribución de las cocinas activas actuales como también las zonas que, habiendo alcanzado la ventana de madurez durante

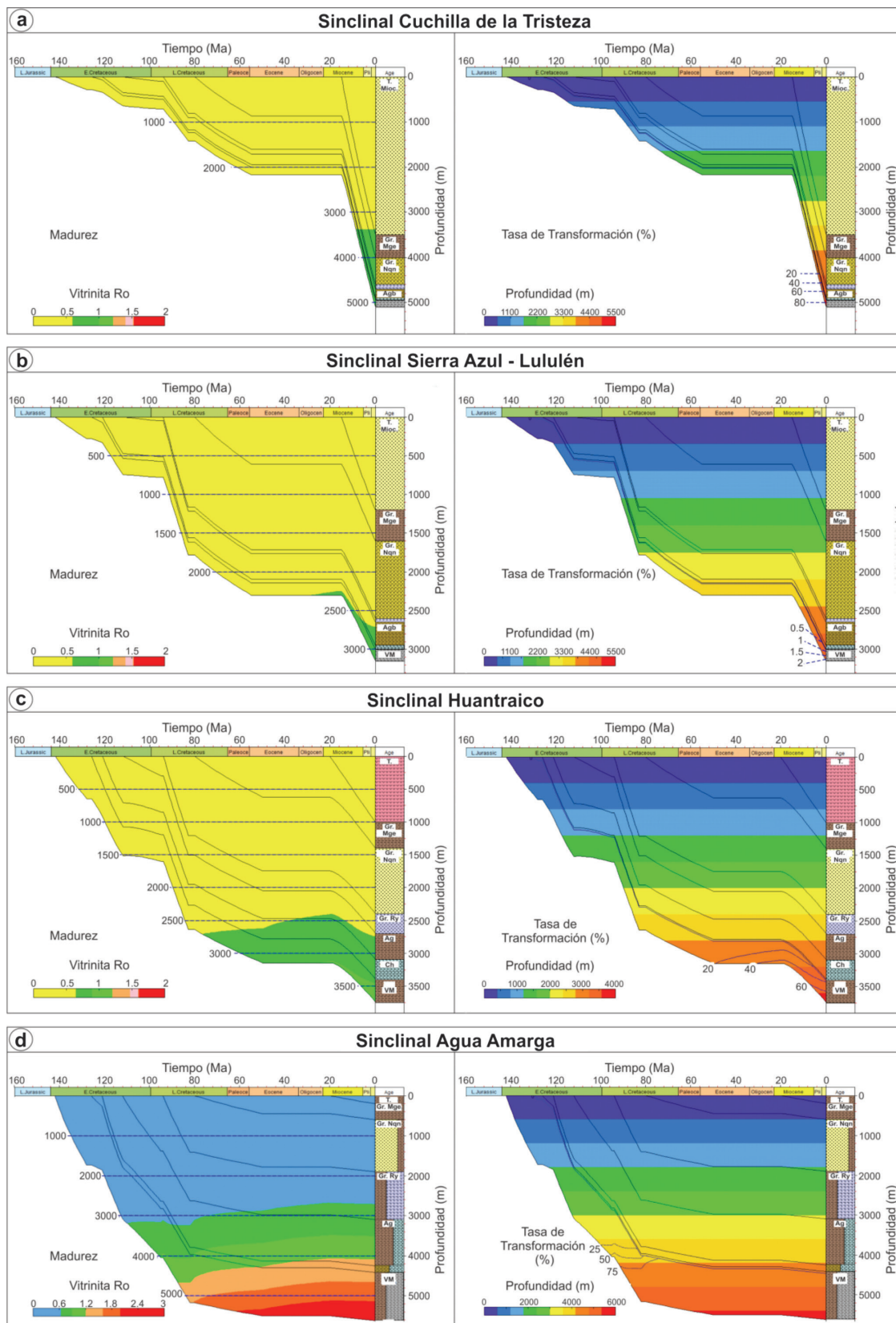


Figura 7. Modelados de madurez térmica 1D sobre los sinclinales situados al este del frente de corrimiento de la FPC.

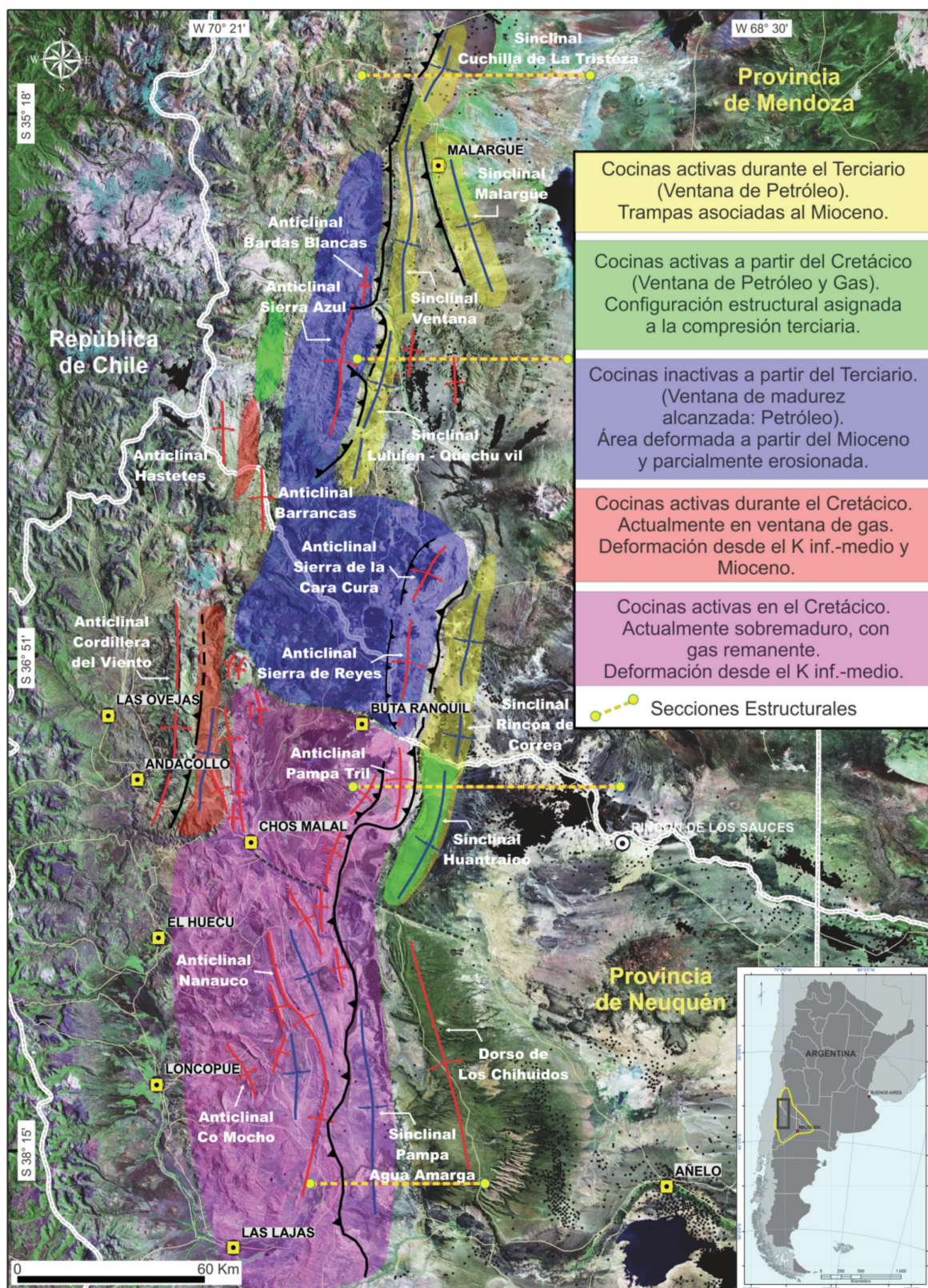
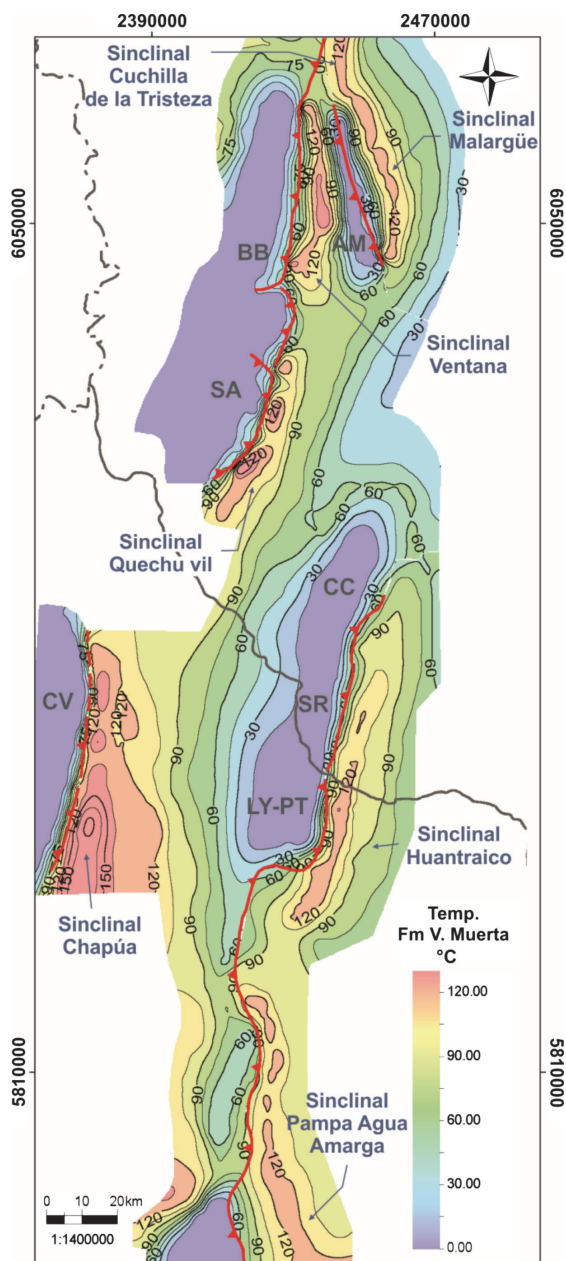


Figura 8. Estado actual de las áreas de generación dentro de la zona de estudio, grado de madurez y edad de las trampas asociadas.

el Cretácico-Terciario, se fueron desactivando por efecto del levantamiento tectónico y erosión parcial o total de la columna sedimentaria, sobreyacente quedando de esta manera por debajo del umbral de las condiciones térmicas necesarias para generar hidrocarburos. Para ilustrar este concepto se construyó un mapa que muestra la ubicación de las cocinas “activas” e “inactivas”, donde también se indica el grado de madurez de Vaca Muerta y la edad de las trampas en cada cocina (Figura 8). Paralelamente se realizó un mapa isotérmico que muestra las temperaturas actuales de toda la región en base a mediciones directas de pozos y gradientes geotérmicos, pudiéndose discriminar claramente las zonas suficientemente soterradas y con temperaturas apropiadas para generar hidrocarburos de aquellas regiones que actualmente se encontrarían inactivas, con temperaturas menores a los 60°C (Figura 9). En el corte estructural esquemático entre la Sierra Azul y el sinclinal Malargüe se muestran los conceptos previamente mencionados (Figura 10).

Figura 9. Mapa isotérmico, indicando las temperaturas actuales y los principales sinclinales. Datos de entrada: mediciones en pozos y gradientes geotérmicos regionales. BB: Bardas Blancas, AM: Anticlinal Malargüe, SA: Sierra Azul, CC: Cara Cura, SR: Sierra de Reyes, LY-PT: La Yesera-Pampa Tril y CV: Cordillera del Viento.



La Fm Vaca Muerta actualmente se encontraría generando hidrocarburos solamente en los sinclinales frontales y zonas triangulares con exclusividad en el sector septentrional del ámbito de la FPC, principalmente al norte del lineamiento de Cortaderas.

En base a estudios publicados por otros autores (Legarreta *et al.*, 2003, Legarreta *et al.*, 2008, Karg y Pomilio, 2009) y los modelos 1D presentados en este trabajo, se deduce que la generación de hidrocarburos en la base de la Fm Vaca Muerta habría comenzado en la Faja del Agrio alrededor de los 110 Ma, encontrándose desde el Cretácico en ventana de gas. En la zona del sinclinal de Huantraico el inicio de la generación habría comenzado aproximadamente a los 75-80 Ma, más

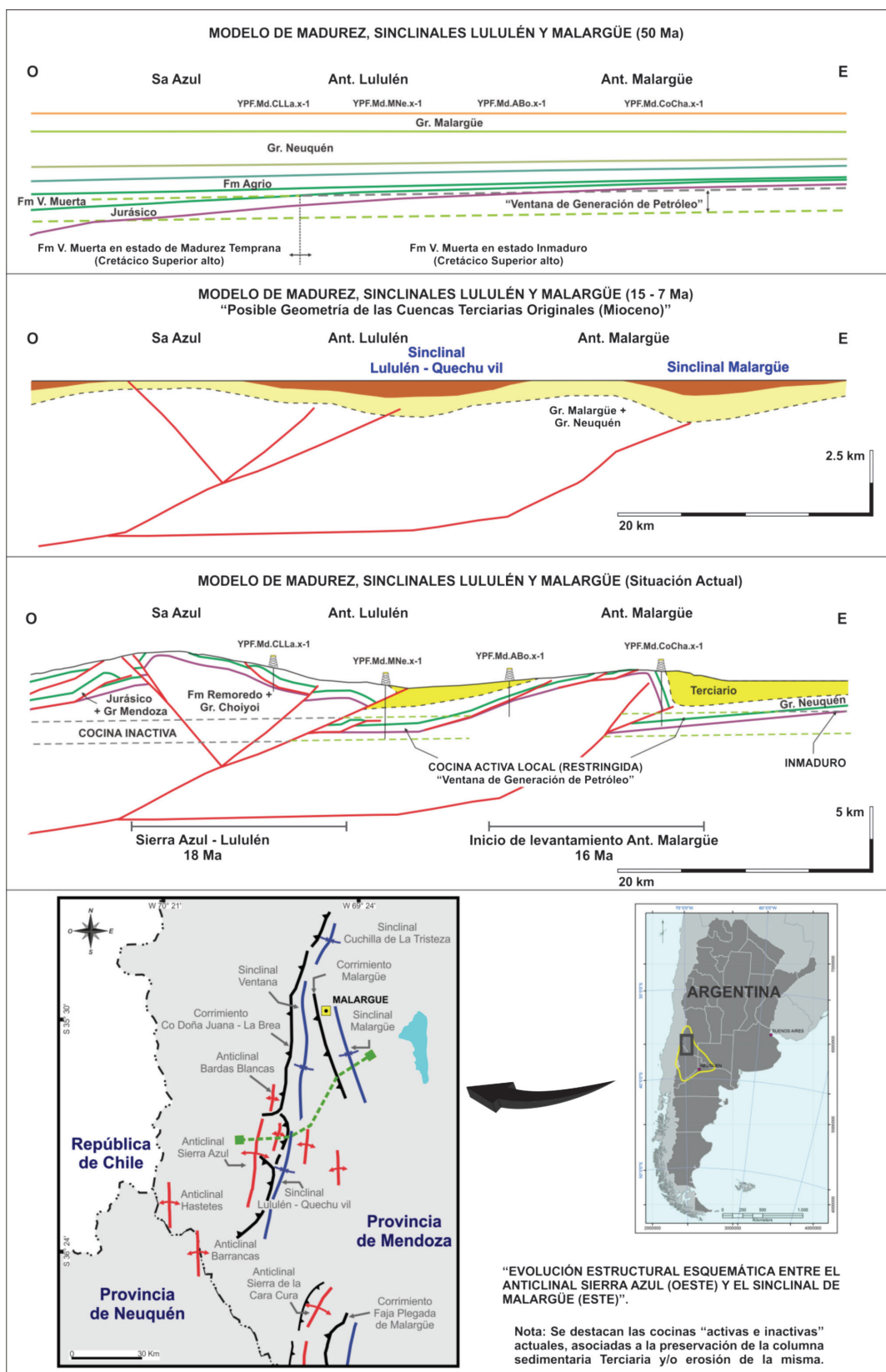


Figura 10. Sección estructural esquemática desde el anticlinal Sierra Azul (oeste) hasta el sinclinal de Malargüe (este).

hacia el norte, en el Sinclinal de Quechu vil esto habría ocurrido cercano a los 30 Ma, y finalmente, en el Sinclinal de la Cuchilla de la Tristeza recién en torno a los 10 Ma (Figura 7).

Existiría entonces un diacronismo importante en la generación y expulsión de hidrocarburos de sur a norte, semejante a lo planteado por Legarreta *et al.*, 2008 para la FPC en general.

Es importante destacar que al norte del Río Barrancas y por encima de algunas de las principales estructuras de basamento (Sa. Azul, Bardas Blancas, etc.) habría existido una columna sedimentaria de edad terciaria y de carácter sinorogénico, actualmente erosionada parcial o totalmente, ello se deduce dado que es necesario en estos casos una mayor pila sedimentaria para poder explicar la evolución térmica alcanzada en los niveles pelíticos - margosos de la Fm Vaca Muerta. Esto indicaría que el relleno Terciario de algunos de los sinclinales frontales y zonas triangulares ubicados al norte del “lineamiento Cortaderas” representarían relictos modernos preservados de la erosión por efectos tectónicos posiblemente posteriores a los 5 Ma. Es decir que, estas cubetas terciarias habrían tenido mayor extensión que las que se definen en la actualidad (Silvestro y Kraemer, 2005, Silvestro y Atencio, 2009) (Figura 10).

VOLUMEN DE HIDROCARBUROS GENERADOS EN LAS COCINAS ACTIVAS (PODS)

A partir de la interpretación estructural regional y en base a los modelos de madurez calculados, se realizó una estimación volumétrica de los hidrocarburos generados por la Fm Vaca Muerta sobre algunas de las cocinas activas asociadas con el frente de la FPC. Para efectuar estos cálculos se tuvo en consideración el espesor de la roca madre involucrada, los valores de COT conocidos, las tasas de transformación y madurez, y el área de la cocina. Se utilizó el programa *apt* (*Geochemical Mass Balance Calculator*) que permite estimar el volumen de hidrocarburos generados y expulsados.

Dentro del ámbito de la faja plegada resulta importante conocer con precisión el estilo de deformación, la magnitud del acortamiento y el ángulo de corte de las fallas de basamento de primer orden, con el único fin de definir la posible extensión de las cocinas por debajo de esas fallas principales. Datos geofísicos como la sísmica 3D, la magnetotelúria, gravimetría y la construcción de secciones estructurales balanceadas son elementos que nos permiten definir la ubicación, extensión y las dimensiones generales de estas cocinas. En ciertos casos, como al sur del sinclinal de Huantraico, y al norte del sinclinal de Quechu vil, se pueden observar importantes extensiones de las cocinas por debajo de los corrimientos de basamento, pudiendo alcanzar hasta 5 km subyaciendo a las fallas de primer orden, lo cual permitiría explicar más claramente el volumen “*in situ*” de petróleo y gas comprobado en los yacimientos asociados directamente con estas cocinas (Filo Morado, El Portón, Chihuido de la Salina). Estos conceptos fueron sugeridos y planteados por otros geólogos que participaron en la búsqueda de hidrocarburos y en las primeras interpretaciones estructurales de la región (Ploszkiewicz, 1987, Viñes, 1990).

Los volúmenes de hidrocarburos (P50) generados y expulsados, estimados en las cocinas activas (PODS) más importantes del área de estudio se detallan a continuación:

- Sinclinal de Huantraico:

Petróleo generado: 13000 MMm³; Gas generado: 629000 MMm³.

Petróleo expulsado: 5560 MMm³; Gas expulsado: 176000 MMm³.

Extensión de la cocina: 1075 km².

- Sinclinal de Lululén - Quechu vil:

Petróleo generado: 4214 MMm³; Gas generado: 228000 MMm³.

Petróleo expulsado: 1829 MMm³; Gas expulsado: 74000 MMm³.

Extensión de la cocina: 625 km².

- Sinclinal Ventana:

Petróleo generado: 3895 MMm³; Gas generado: 172000 MMm³.

Petróleo expulsado: 1632 MMm³; Gas expulsado: 5200 MMm³.

Extensión de la cocina: 425 km².

- Sinclinal Cuchilla de la Tristeza:

Petróleo generado: 1431 MMm³; Gas generado: 77800 MMm³.

Petróleo expulsado: 610 MMm³; Gas expulsado: 21900 MMm³.

Extensión de la cocina: 775 km².

Cabe recordar que las cocinas (PODS) ubicadas al norte, como en el caso de la Cuchilla de la Tristeza, presentan facies reducidas en cuanto a la capacidad de generación para la Fm Vaca Muerta (aunque podrían mejorar hacia el oeste, debajo del corrimiento principal del basamento), un menor espesor y contenido de materia orgánica que hacia el sur. Esto significaría una disminución del volumen de hidrocarburos generados hacia el norte, y por lo tanto un menor volumen disponible para su posterior migración hacia el antepaís.

TIMING DE LA DEFORMACIÓN Y PROSPECTIVIDAD DEL SISTEMA PETROLERO ASOCIADO A LA FM VACA MUERTA

Para caracterizar adecuadamente los sistemas petroleros en cualquier faja plegada y dirigir la exploración de hidrocarburos correctamente, es fundamental comprender el rol que la evolución estructural de la región juega sobre la madurez final de las rocas madres, la migración de los hidro-

carburos, su preservación en la trampa y la efectividad de los sellos; como así también, es de vital importancia conocer la forma y extensión de los sinclinales asociados con las principales estructuras de basamento, la geometría de las fallas en profundidad y la magnitud de los acortamientos, aspectos particulares de cada faja plegada.

La exploración de hidrocarburos en la FPC de Neuquén y Mendoza tuvo resultados muy diversos debido a las grandes variaciones que presentan los elementos de los sistemas petroleros actuantes. En este trabajo se puso especial interés en comprender como el *timing* de los eventos tectónicos afectó al sistema petrolero de Vaca Muerta dentro de este ambiente netamente compresivo.

En el área estudiada se han reconocido diferentes pulsos tectónicos que abarcarían desde el Cretácico inferior hasta el Plioceno definiéndose en distintas regiones varios eventos polifásicos. Se menciona que tanto el Grupo Neuquén como también el Grupo Malargue son considerados eventos relacionados con facies sinorogénicas. (Uliana y Biddle, 1988, Mescua, *et al.*, 2013). En el sector externo de la faja plegada y en dirección al norte, en el ámbito comprendido entre el lineamiento Cortaderas y la Cuchilla de la Tristeza la deformación compresiva habría ocurrido a partir de los 45 Ma de acuerdo a datos de AFTA (base de datos propia de Wintershall) efectuados en la Sierra de Cara Cura y Bardas Blancas, hasta los 3 Ma aproximadamente. Asociadas con la deformación coexistieron rocas volcánicas de la Formación Palauco (23-18 Ma) y Molle (17-13 Ma) en el sur y sus equivalentes las Fms Agua de la Piedra (23 Ma) y Tristeza (3-5 Ma) hacia el norte, principalmente de carácter sedimentario-piroclástico de tipo sinorogénico (Manceda y Figueroa, 1993, Kozlowski *et al.*, 1997, Kay, 2001, Zapata *et al.*, 2002, Cobbold y Rosello, 2003, Silvestro y Kraemer, 2005, Zamora Valcarce, 2006, Giambiagi *et al.*, 2009, Silvestro y Atencio, 2009, Combina y Nullo, 2000, Orts *et al.*, 2012, Sagripanti *et al.*, 2012).

En coincidencia con estas etapas de deformación se conformaron las principales trampas estructurales de la región, algunas de ellas se preservaron (Puesto Rojas, Cerro Mollar, Filo Morado, El Portón, Chihuido de la Salina, etc.) mientras que otras posiblemente perdieron la capacidad de sello por fracturamiento (Cruz, *et al.*, 1996, Kozlowski *et al.*, 1997, Giampaoli *et al.*, 2005) produciéndose migraciones secundarias y la disponibilidad de líquidos para cargar otras estructuras localizadas pendiente arriba.

Un punto a destacar es la situación reinante actualmente al oeste de la Sierra de Reyes - Cara Cura, donde se verificó la existencia de una importante deformación compresiva de edad Mioceno (17Ma), que discordancia mediante es cubierta por andesitas de la Fm Molle (17-13 Ma) afectada por una reactivación posterior a los 5 Ma que pliega toda la columna involucrada. Como consecuencia de la suma de estos pulsos tectónicos la Fm Vaca Muerta, que habría alcanzado distintos grados de madurez durante el Cretácico, se halla actualmente “inactiva”, es decir, por debajo del umbral de generación, encontrándose a profundidades que van desde los 1000 m en las cercanías del valle del Río Grande hasta 2500 m al oeste de El Vatro, en este último con temperaturas que están alrededor de los 70 °C. En esta región solamente la existencia de sinclinales lo suficientemen-

te soterrados, y actualmente cubiertos por vulcanitas Miocenas podrían tener potencial generador.

Los numerosos afloramientos de petróleo en la FPC tanto dentro de Vaca Muerta como de Agrio indican que en algún momento ambas unidades generaron hidrocarburos (Cobbald *et al.*, 1999). Este detalle, que no resulta menor, sumado a otros estudios de carácter regional donde se menciona la madurez en este ambiente tectónico (Kozlowski *et al.*, 1997), llevó durante las primeras etapas de exploración a minimizar los aspectos relacionados con la efectividad de la roca madre; asumiendo que, en el sistema petrolero de la Fm Vaca Muerta en casi toda la faja plegada la madurez y consecuente generación de hidrocarburos estaba asegurada independientemente de su historia tectónica, sobre todo dentro de la Provincia de Mendoza.

Del análisis efectuado sobre una cantidad importante de pozos exploratorios “secos” situados en zonas deformadas someras (hasta 1500 metros de profundidad) se han evidenciado pobres manifestaciones de hidrocarburos durante las perforaciones, aún dentro de las secciones generadoras del Grupo Mendoza, que si bien estuvieron lo suficientemente maduras muestran un comportamiento disímil y empobrecido en lo que respecta a las manifestaciones. Además, no existe sobrepresión, lo cual contrasta con la situación de las mismas rocas en ambientes estructurales coincidentes con los sinclinales frontales u otros tectónicamente más estables como los del engolfamiento neuquino. Dos aspectos se pueden mencionar para clarificar esta situación, el primero es que la roca madre se encuentra actualmente “fría o inactiva” y el segundo se refiere a la preservación, afectada fundamentalmente por las sucesivas etapas de deformación.

Se debe destacar la influencia térmica localizada por efecto de intrusivos andesíticos de edades comprendidas entre el Oligoceno y el Mioceno que están presentes tanto en la FPC como en el antepaís, y también la escasa a nula alteración en las rocas madre por efecto del vulcanismo de arco e intraarco del Mioceno, efecto comprobado regionalmente por información proveniente de estudios de reflectancia de vitrinita y/o pirólisis realizada sobre el material de varios pozos perforados.

Por su parte y fuera del alcance de éste trabajo, es posible decir que, la Fm Agrio con sus características estratigráficas y geoquímicas también resultará controlada y afectada por los eventos tectónicos terciarios que intervinieron en la evolución térmica de la Fm Vaca Muerta, fenómenos que en conjunto arrojan un área madura menor para la Fm Agrio que para la Fm Vaca Muerta, como fuera mencionado por Legarreta *et al.*, 2005.

Con el propósito de integrar los elementos del sistema petrolero vinculado a la Fm Vaca Muerta se construyeron cinco cartas de eventos, tres de ellas sobre áreas actualmente “activas” y las dos restantes sobre una región “inactiva” térmicamente a raíz de la intensa deformación actuante (Figura 11). A continuación se describen brevemente cada una de ellas:

La primera se ubica al norte de la faja plegada, sobre el sinclinal frontal Cuchilla de la Tristeza y presenta una subsidencia total de 5100 m para la base de Vaca Muerta, correspondiéndole al Terciario 3500 m, el inicio de la generación de hidrocarburos ocurrió en el Terciario (Mioceno) al

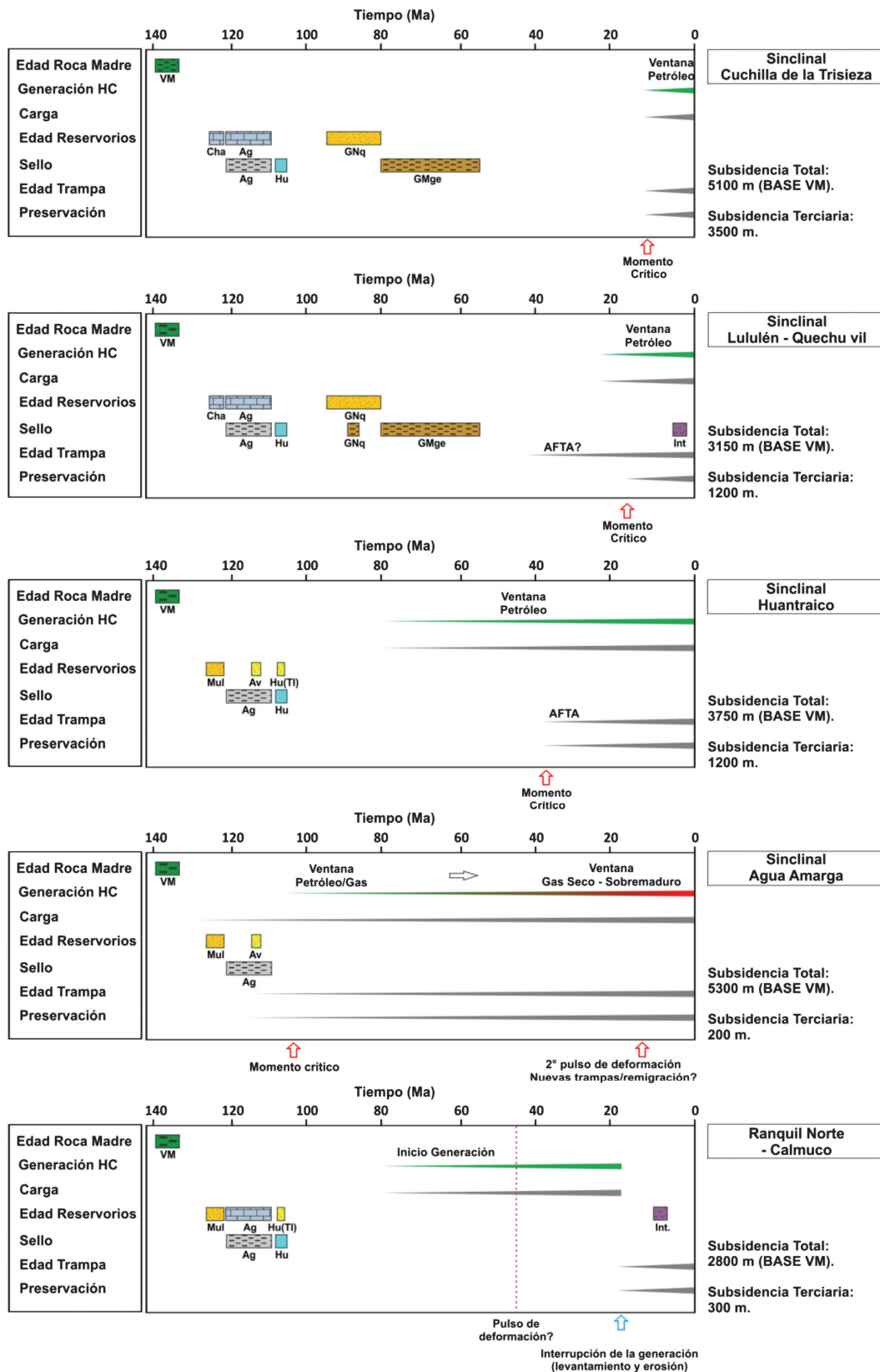


Figura 11. Carta de Eventos, considerando de acuerdo al objetivo de éste trabajo sólo la Fm Vaca Muerta como roca generadora.

igual que la formación de las trampas. Los petróleos encontrados tienen una gravedad API de 30 a 35 grados y se encuentra actualmente en ventana de petróleo.

La segunda carta de eventos se construyó sobre el sinclinal de Lululén - Quechuvil donde la subsidencia total a la base de Vaca Muerta fue de 3150 m, correspondiéndole al Cretácico 1950 m y al Terciario 1200 m, en este caso la generación también habría ocurrido en el Terciario al igual que la edad de las trampas. Los petróleos asociados a esta zona son de 28-30° API, actualmente se encuentra en ventana de petróleo.

La tercera involucra el sinclinal de Huantraico que habría tenido una subsidencia total de 3750 m a la base de Vaca Muerta, distribuidos 2550 m en el Cretácico y 1200 m en el Terciario. Parte de la generación y expulsión habría acontecido en el Cretácico, continuando luego en el Terciario, la edad de las trampas asociadas sería Mioceno pese a que los primeros pulsos de deformación datan del Terciario inf. Los hidrocarburos encontrados varían entre 42° API al sur hasta 26° API al norte del sinclinal. Actualmente se encuentra en ventana petróleo incrementando su madurez desde el norte hacia el sur. Es posible que en estos petróleos asignados a Vaca Muerta, exista alguna contribución de Agrio que se encontraría en la ventana inicial de generación.

La cuarta carta se creó sobre el sinclinal de Agua Amarga, al sur del lineamiento Cortaderas, en este caso la subsidencia total fue de 5300 m habiendo ocurrido la misma principalmente durante el Cretácico, correspondiéndole al Terciario un escaso espesor cercano a los 200 m. Esta región habría alcanzado la ventana de gas en el Cretácico y actualmente se encuentra sobremadura para Vaca Muerta, y posiblemente con potencial generador para la Fm Agrio.

La quinta y última carta fue confeccionada al oeste de la Sierra de Reyes, en la zona de Ranquil Norte-Calmuco para mostrar la interrupción en la generación en una zona levantada y erosionada durante el Terciario. En este caso Vaca Muerta entró en ventana inicial de generación en el Cretácico, con una subsidencia total para la base de Vaca Muerta de 2500 m al Cretácico, al que se le deben sumar 300 m del Terciario volcánico (Mioceno), previamente a la depositación terciaria por procesos de levantamiento y erosión la columna cretácica quedó reducida a no más de 1500 m. en los anticlinales. Actualmente la generación estaría interrumpida y Vaca Muerta “inactiva” en amplias regiones.

Como comentario final, podemos decir que en la Faja Plegada del Agrio, particularmente en el entorno del sinclinal Agua Amarga, la temperatura que presenta la Fm Vaca Muerta a su actual profundidad de soterramiento ronda los 120°C (Figura 9), aunque desde el punto de vista geoquímico la unidad no tendría actualmente potencial generador (madurez, $R_o > 2$), considerándose que los hidrocarburos existentes en la región habrían migrado con anterioridad a la formación de las trampas asociadas a la deformación terciaria y en sincronismo con la generación de posibles estructuras cretácicas. No obstante, algunos de los pozos perforados en trampas anticlinales dentro de este ambiente geológico (YPF.Nq.QM.x-1, YPF.Nq.PMu.x-1, YPF.Nq.PHa.x-1, etc.) evidenciaron una importante sobrepresión y también ensayaron gas combustible seco. Esto podría

indicar la existencia de fluidos remanentes dentro de la roca madre que migraron en algunos casos hacia reservorios fracturados del Cretácico; caso que puede ser considerado en etapas futuras de exploración, enfocada en la búsqueda de reservorios fracturados en posibles trampas originadas a partir del Cretácico inferior, cuando la roca madre se encontraba en ventana de gas. Se infiere que sobre las trampas del Cretácico se sobreimpuso la deformación terciaria modificando en algunos casos las estructuras preexistentes y conformando también otras nuevas (Zamora, 2006, Cobbold y Rosello, 2003).

CONCLUSIONES

La madurez de la Fm Vaca Muerta en la FPC fue alcanzada en distintos tiempos geológicos, desde el Cretácico en el sur, provincia de Neuquén, hasta el Mioceno en el norte, dentro de la Provincia de Mendoza. Se definieron seis cocinas actualmente activas (PODS) para la Fm Vaca Muerta que están asociadas con los sinclinales frontales y zonas triangulares contiguas a los grandes anticlinales de basamento, encontrándose estos bajos estructurales con distinto grado de madurez, desde sobremaduros al suroeste hasta en ventana de generación de petróleo al norte. La suma de la subsidencia cretácica, las facies y espesores originales de la Fm Vaca Muerta y la deformación terciaria polifásica con su consecuente subsidencia por carga tectónica localizada (sinclinales frontales y zonas triangulares), levantamiento, erosión parcial o total de la columna sedimentaria y la preservación de los sellos ejercieron un papel primordial en la existencia de los PODS actuales.

Considerables regiones deformadas entre las estructuras de basamento mayores se encontrarían actualmente inactivas, es decir, incapaces de generar hidrocarburos, habiendo alcanzado su madurez incipiente en algunos casos durante el Cretácico y luego perdiendo su capacidad de generación al haberse levantado y enfriado durante el Mioceno, sencillamente por encontrarse la roca madre por debajo del umbral térmico de generación. El potencial exploratorio en este último caso dependerá exclusivamente de la calidad y tipo de conexión estructural y/o estratigráfica entre las posibles trampas con las cocinas activas capaces de aportar hidrocarburos, sin dejar de lado un factor extremadamente importante como lo es la preservación de las trampas preexistentes, sus sellos y la posible biodegradación de los fluidos entrampados.

Puntualmente y en menor orden de importancia en la faja plegada los intrusivos Terciarios emplazados dentro del Grupo Mendoza, principalmente aquellos que yacen en forma paralela o sub-paralela a la roca de caja pueden inducir la generación de hidrocarburos localizada, estando los volúmenes asociados a su espesor y extensión areal.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento a Wintershall Energía S.A por permitir la publicación de este trabajo. Así mismo, agradecer la colaboración de aquellos colegas que han participado en la lectura crítica de éste manuscrito.

REFERENCIAS CITADAS

- Cobbold, P.R., Diraison M., Rosello, E.A., 1999, Bitumen veins and Eocene transpression, Neuquen Basin, Argentina. *Tectonophysics*. 314, 423- 442.
- Cobbold, P.R., Rosello, E.A., 2003, Aptian to recent compressional deformation, foothills of the Neuquen Basin, Argentina. *Marine and Petroleum Geology* 20, 429-443.
- Combina, A., Nullo, F., 2000, La Formación Loma Fiera (Mioceno Superior) y su relación con el vulcanismo y el tectonismo neógeno, Mendoza. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 55 (3): 201-210.
- Cruz, C.E., Villar, H.J. y Muñoz, 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 AGA-IAPG. Actas I.p.223-242, Buenos Aires.
- Cruz, C.E., Kozlowski E. y Villar H., 1998, Agrio (Neocomian) petroleum systems. Main target in the Neuquen Basin thrust belt, Argentina. 1998 AAPG International Conference and Exhibition, Rio de Janeiro, Brasil, p.670-671.
- Fantín, J., Vitarella, L., 2011, Interpretación sísmica y caracterización estructural en zonas de faja plegada y corrida. VIII Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos.
- Folguera, A., Ramos, V., Zapata, T. y Spagnuolo, M., 2007, Andean evolution at the Guañacos and Chos Malal fold and thrust belts (36°30'-37°S). *Journal of Geodynamics* 44 (2007) 129-148.
- Galarza, B.J., Zamora Valcarce, G., Folguera, A. y Botessi, G., 2009, Geología y evolución tectónica del frente cordillerano a los 36° 30': Bloques de Yuhuín Huaca y Puntilla de Huincán. Mendoza. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 65(1): 170-191.
- Giambiagi, L., Ghiglione, M., Cristallini, E. y Botessi, G., 2009, Características estructurales del sector sur de la faja plegada y corrida de Malargüe (35°-36°): Distribución del acortamiento e influencia de estructuras previas. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 65(1): 140-153.
- Giampaoli, P., Ramírez J. y Gait M., 2005, Estilos de entrapamiento en la faja plegada y fallada de Malargüe, en Kozlowski E., Vergani G. y Boll A., eds. *Las trampas de hidrocarburos en la cuencas productivas de Argentina*, Simposio del VI Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, IAPG. P.121-140. Buenos Aires.
- Karg H. y Pomilio A., 2002, Basin modeling in the Andean foreland, west of the río Grande (Ranquil Norte area, Neuquen basin, southern Mendoza). V Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos. Mar del Plata.
- Kay, S.M., 2001, Tertiary to recent magmatism and tectonics of the Neuquen basin, between 36.5° and 38°S latitude. Repsol-YPF, Buenos Aires. Informe inédito.

- Kietzmann, D., 2007, Cicloestratigrafía y Bioestratigrafía de la Formación Vaca Muerta, origen y frecuencia de su ritmicidad Arroyo Loncoche - Malargüe, Mendoza. Trabajo Final de Licenciatura, Universidad de Buenos Aires . Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Dpto de Ciencias Geológicas.
- Kozlowski, E., Cruz, C., and Sylwan, C., 1997, Modelo exploratorio en la faja plegada y corrida de la cuenca neuquina, Argentina. Sexto Simposio Bolivariano "Exploración Petrolera en las Cuencas Subandinas". Memorias I: 15-31.
- Legarreta, L. y Uliana, M., 1991, Jurassic-Cretaceous marine oscillations and geometry of backarc basin fill. Central Argentine Andes, en D. I. M. McDonald, ed., Sea level changes at active plate margins, International Association of Sedimentology, Special Publication 12, p. 429-450.
- Legarreta, L., Gulisano, C. y Uliana, M., 1993, Las secuencias sedimentarias jurásico-cretácicas, en V. A. Ramos, ed., Geología y Recursos Naturales de Mendoza. Relatorio del XII Congreso Geológico Argentino y II Congreso de Exploración de Hidrocarburos, p. 87-114.
- Legarreta, L., Cruz, C., Laffitte G. y Villar, H., 2003, Source rocks, reserves, and resources in the Neuquen Basin, Argentina: Mass -balance approach and exploratory potential, International Congress and Exhibition of the AAPG. Abs., Barcelona, España, AAPG Bulletin, v.87, N° 13 (Supplement).
- Legarreta, L., Cruz, C., Vergani G., Laffitte G. y Villar H., 2004, Petroleum Mass - Balance of the Neuquen Basin, Argentina: A Comparative Assessment of the productive Districts and Non-Productive Trends, International Congress and Exhibition of the American Association of Petroleum Geologists, Expanded Abstract, 6 p, Cancun, Mexico, AAPG Bulletin, v. 88, N°13 (Supplement).
- Legarreta, L., Villar, H., Laffitte, G., Cruz C. y Vergani, G., 2005, Cuenca Neuquina, en G. A. Chebli, J. S. Cortiñas, L. Spalletti, L. Legarreta y E. L. Vallejo, eds., Frontera Exploratoria de la Argentina, Simposio del VI Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, IAPG, p. 233-250, Buenos Aires.
- Legarreta, L., Villar, H., Cruz C., Laffitte, G. y Varadé, R., 2008, Revisión integrada de los sistemas generadores, estilos de migración-entrapamiento y volumetría de hidrocarburos en los distritos productivos de la Cuenca Neuquina. VII Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos. Simposio Sistemas Petroleros de las Cuencas Andinas. p. 79-108
- Manceda, R., Figueroa, D., 1993, La inversión del rift mesozoico en la faja fallada y plegada de Malargüe. XII Congreso Geológico Argentino y II Congreso de Exploración de Hidrocarburos, Actas 3: 179-187. Mendoza.
- Mescua, J., Giambiagi, L., Ramos, V., 2013, Late Cretaceous Uplift in the Malargüe fold-and thrust belt (35°S) southern Central Andes of Argentina and Chile. Andean Geology 40(1)102-116, 2013.
- Mitchum, R. y Uliana, M., 1985, Seismic stratigraphy of carbonate depositional sequences, Upper Jurassic-Lower Cretaceous, Neuquen Basin, Argentina. En: Berg, B. y Woolverton, D. (Eds) Seismic Stratigraphy 2. An integrated approach to hydrocarbon analysis. AAPG, Memoir 39: 255-83.
- Orts, D., Folguera, A., Gimenez, M. y Ramos, V., 2012, Variable structural controls through time in the Southern Central Andes. Andean Geology 39(2): 220-241.

- Ploszkiewicz, J.V., 1987, Las zonas triangulares de la faja fallada y plegada de la Cuenca Neuquina. Argentina. X Congreso Geológico Argentino, Actas I: 177-180.
- Ploszkiewicz, J.V. y Viñes, R., 1987, Filo Morado un descubrimiento exploratorio en el cinturón plegado. Boletín de Informaciones Petroleras, 10, 97-102.
- Sagripanti, L., Botessi, G., Kietzmann, D., Folguera, A. y Ramos, V., 2012, Mountain building processes at the orogenic front. A study of the unroofing in Neogene foreland sequence. Andean Geology 39(2): 201-219.
- Sigismondi, M.E. y Ramos, V., 2009, El flujo de calor en la Cuenca Neuquina. Revista Petrotecnia Feb. 2009, p. 64-81.
- Silvestro, J. y Kraemer, P., 2005, Evolución tecto-sedimentaria de la Cordillera Principal en el sector surmendocino a los 35°30'S, Faja plegada de Malargüe, República Argentina: VI Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Artículo 25 Mar del Plata- CD ROM.
- Silvestro, J., Atencio, M., 2009, La Cuenca Cenozoica del Río Grande y Palauco, Evolución y Control Estructural, Faja Plegada de Malargüe. Revista de la Asociación Geológica Argentina 65(1): 154-169.
- Urien, C.M., y Zambrano, J.J., 1994, Petroleum systems in the Neuquen Basin, Argentina. In L.M. Magoon & Dow (Eds). The petroleum system-from source to trap, (Vol.60, pp. 513-534). AAPGM.
- Uliana, M.A., Biddle, K.T., 1988, Mesozoic-Cenozoic paleogeographic evolution of southern South America. AAPG, Memoir 46:599-614.
- Uliana, M.A. y Legarreta, L., 1993, Hydrocarbon habitat in a Triassic-to-Cretaceous Sub-Andean setting: Neuquén Basin, Argentina, Journal of Petroleum Geology, v.16, p. 397-420.
- Uliana, M.A. y Legarreta, L., Laffitte G. y Villar, H., 1999b, Estratigrafía y geoquímica de las facies generadoras en las cuencas petrolíferas de Argentina, IV Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Tomo 1, p-1-91. Buenos Aires.
- Villar, H., Laffitte, G. y Legarreta, L., 1998, The source rocks of the Mesozoic Petroleum Systems of Argentina: a comparative overview on their geochemistry, paleoenvironments and hydrocarbon generation patterns, ABGP/AAPG International Conference & Exhibition, November 8-11, 1998, Rio de Janeiro, Brazil, Abstracts, p.186-187. Republicado en: 1999, IV Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, IAPG, Tomo II, p. 967-968, Buenos Aires.
- Villar, H., Legarreta, L., Cruz, C., Laffitte, G. y Vergani, G., 2005, Los cinco sistemas petroleros coexistentes en el sector sudeste de la Cuenca Neuquina: definición geoquímica y comparación a lo largo de una transecta de 150 km. VI Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, IAPG, Actas CD-ROM- 17 p., Mar del Plata. Republicado en Boletín de Informaciones Petroleras BIP, Cuarta Época Año 2 N° 3, P.50-67.
- Viñes, R.F., 1990, Productive duplex imbrication at the Neuquina Basin thrust belt front. In J. Latouzey (Ed.). Petroleum and Tectonics in mobile belts (pp.69-80). Paris: Editions Technip.
- Zamora Valcarce, G., 2006, Estructura y Cinemática de la Faja Plegada del Agrio, Cuenca Neuquina. Tesis Doctoral Universidad de Buenos Aires.
- Zapata, T.R., Brisson, I., y Dzælalija, F., 1999, The role of the basement in the Andean fold and thrust belt of the Neuquen Basin, Argentina. Thrust Tectonics 99 Conference. Abstract with programme: 122-124.

Zapata, T.R., Corsico, S. y Dzelalija. F., 2002,
Estructura del sector oriental de la faja plegada y
corrida del Agrio, Cuenca Neuquina, Argentina.

XV Congreso Geológico Argentino, El Calafate,
Actas (CD. pdf, 5 pages).