

## **ENTRAMPAMIENTO EN LA FM RAYOSO EN EL ENGOLFAMIENTO Y LA PLATAFORMA NORORIENTAL DE LA CUENCA NEUQUINA. UNA SÍNTESIS PRÁCTICA DE UN MODELO PROSPECTIVO EXITOSO**

Hernán Maretto<sup>1</sup>, Federico Sattler<sup>2</sup>

1: YPF S.A., Neuquén. hernan.maretto@ypf.com

2: Petrobrás Argentina S.A., Neuquén. federico.sattler@petrobras.com

Palabras clave: Fm Rayoso, Modelo de Entrampamiento, Cuenca Neuquina

### **ABSTRACT**

Trapping models for the Rayoso Formation in the embayment and northeast platform of the Neuquén Basin. A practical synthesis of a successful prospective model

Due to the success achieved in the development of Rayoso Fm in Puesto Hernández field, this unit became an important target for production and to a lesser extent efforts in exploration.

The aim of this contribution is to provide a regional framework for sedimentary and trapping models, which supports the development of forward-looking ideas and seeks new exploratory opportunities. Using outcrops and subsurface models, a regional correlation that can be easily tied with seismic for mapping was developed in detail, which also provides a good framework for inter-field relations. Based on these ideas and regional maps, we summarize possible *leads*, migrations pathways and trapping mechanisms that explain existing accumulations and provide guidance in the search for new ones.

### **INTRODUCCIÓN**

A partir del éxito logrado en el yacimiento Puesto Hernández a principios de la década pasada en la producción de acumulaciones hidrocarburíferas en la Fm Rayoso (Figura 1); esta unidad tuvo un protagonismo creciente como destino de los esfuerzos de desarrollo y en menor medida exploratorios.

Su condición de reservorio somero, con baja presión y en algunos casos con petróleos viscosos/biodegradados, sistemáticamente ha resultado en una baja productividad inicial a pesar de sus buenas características como roca almacén. Toda esta situación ha redundado en el hecho de que generalmente se lo ha considerado marginal o de poco interés económico, a pesar de que la presencia de mineralización en esta unidad es conocida al menos desde principio de los años 80.

Su desarrollo con inyección de agua desde el inicio de la actividad de explotación, han mostrado el verdadero potencial de esta Formación, derivando indefectiblemente en una revisión histórica de pozos, conceptos estratigráficos y mecanismos de entrapamiento.

El objetivo de la presente contribución es la de otorgar un marco regional de modelo sedimentario y de entrapamiento, que ayuden al desarrollo de ideas prospectivas y a la búsqueda de nuevas oportunidades.

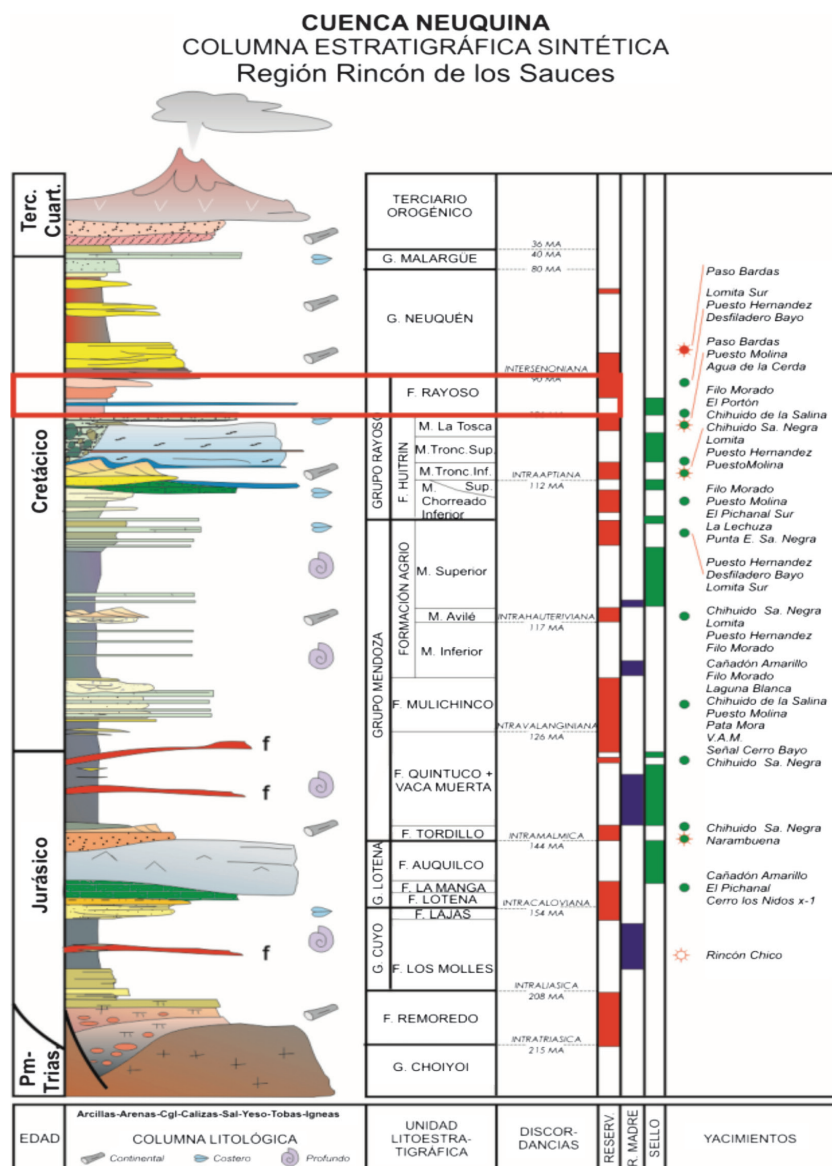


Figura 1. Columna estratigráfica local (tomada de Brisson 1998)

El área de estudio se circunscribe al sector centro-norte de la cuenca neuquina (Figura 2), involucrando los ambientes morfoestructurales correspondientes a la zona norte del engolfamiento y a una porción de la plataforma nororiental.

En éste ámbito, a partir de modelos de afloramiento y subsuelo, se ha efectuado una correlación regional que puede ser atada fácilmente con la sísmica, para su mapeo en detalle, brindando a su vez, un buen marco de referencia para las relaciones interyacimientos.

Sobre estas ideas y mapas regionales se resumen posibles “leads” y mecanismos de migración-entrapamiento que expliquen las acumulaciones existentes y orienten en la búsqueda de nuevas.

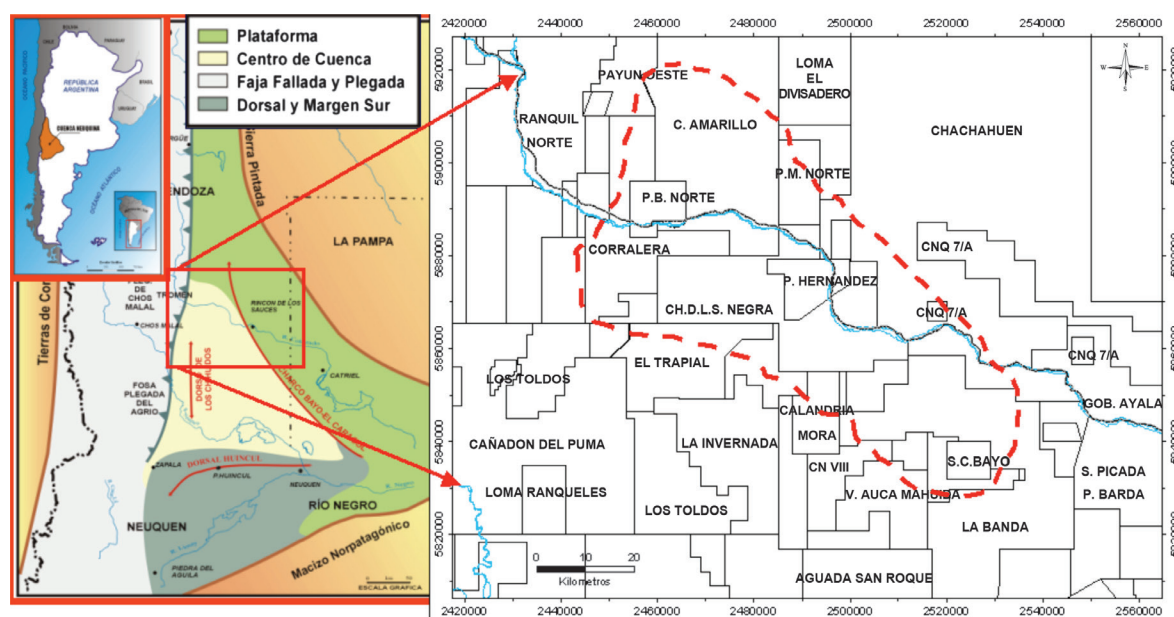


Figura 2. Ubicación de la zona de estudio.

## ESTRATIGRAFÍA, DISTRIBUCIÓN REGIONAL DE FACIES Y MODELO DE CORRELACIÓN

La Formación Rayoso (Barremiano-Aptiano), limita en su base con el Mb La Tosca de la Fm Huitrín y es truncada en su techo por la discordancia Intersenoniana que la separa del Gr Neuquén (Figuras 1, 3 y 4).

Si bien fue definida y estudiada por diversos autores entre los que se destacan Groeber (1946) y Herrero Ducloux (1946), su ordenamiento estratigráfico vigente corresponde a Legarreta y Boll (1982).

Su espesor total varía desde aproximadamente 1000 metros en posiciones geográficas como Filo Morado, hasta ser prácticamente erosionada en su totalidad en posiciones orientales a los pozos El Atamisqui - Agua de Panul al NE del Río Colorado.

Su modelo y ambiente de depositación ha sido definido, discutido y analizado por diferentes autores, siendo excelentes síntesis los trabajos de Legarreta y Boll (1982), Pereyra y Márquez (1984), Legarreta (1985), Marteau y Olmos (2005), Zavala *et al.* (2011); Olea *et al.* 2002; entre otros citados en los mismos, a los que vale remitirse para profundizar en esta materia.

En referencia a los trabajos citados previamente se puede resumir lo siguiente:

Las asociaciones de facies presentes en la Formación Rayoso pueden agruparse básicamente en dos (Zavala *et al.* 2011):

- Una que dicho autor denomina “lago salino restringido”, compuesta por pelitas rojas, y areniscas finas cíclicamente apiladas, interestratificadas con niveles de carbonatos (estromatolitos), anhidrita y halita.

- Otra caracterizada por sedimentos desde arena fina a conglomerádica y pelitas laminadas. Estos cuerpos arenosos tienen formas desde lenticulares a tabulares y se encuentran frecuentemente amalgamados formando bancos conectados con extensiones kilométricas. Genéticamente se los vincula a cursos efímeros con abundante carga en suspensión que ingresan a un ambiente lacustre, palustre o barreal, descargando sedimentos o produciendo desbordamientos en las planicies de inundación.

Estos mecanismos de sedimentación son coherentes con un ambiente árido o semiárido donde se desarrollan lluvias episódicas y de gran intensidad, en regiones con muy poca pendiente, resultando en cuerpos tabulares y extensos con buena conectividad hidráulica (tanto en sí mismos como por amalgamamiento).

La Fm Rayoso se divide en dos Miembros, uno inferior denominado Mb Evaporítico, donde predominan las asociaciones de facies de “lago salino restringido”; y otro superior denominado Mb Clástico. Éste último, a su vez, puede dividirse en dos secuencias, una predominantemente arenosa a la base y otra con arenas más finas y dominio pelítico hacia el techo de la unidad (Figuras 3 y 4). Si bien es cierto que ambas muestran un ordenamiento estrato-grano decreciente, dada la calidad y la abundancia de arenas, el intervalo basal es el que reviste mayor interés petrolero.

En base a este arreglo interno, cuyas diferencias pueden vincularse tanto a variaciones climáticas (mayores lluvias/dilución por climas más húmedos) como a cuestiones tectónicas (espacio de acomodación generado por fallas), se procedió a dividir a la Fm Rayoso en ciclos (Figuras 3 y 4).

Se denominó como “Ciclo 1” al intervalo equivalente a todo el Mb Evaporítico, en tanto que el Mb Clástico se lo dividió en “Ciclo 2”, “Ciclo 3” y “Ciclo 4” (Figuras 3 y 4). Los Ciclos 2 y 3 se corresponden con las secuencia arenosa basal, con buenos reservorios y de interés petrolero, en tanto que el ciclo 4 representa la secuencia superior, cuyo predominio pelítico y de arenas finas con mala petrofísica le otorgan más un carácter sellante o marginal que como potencial reservorio.

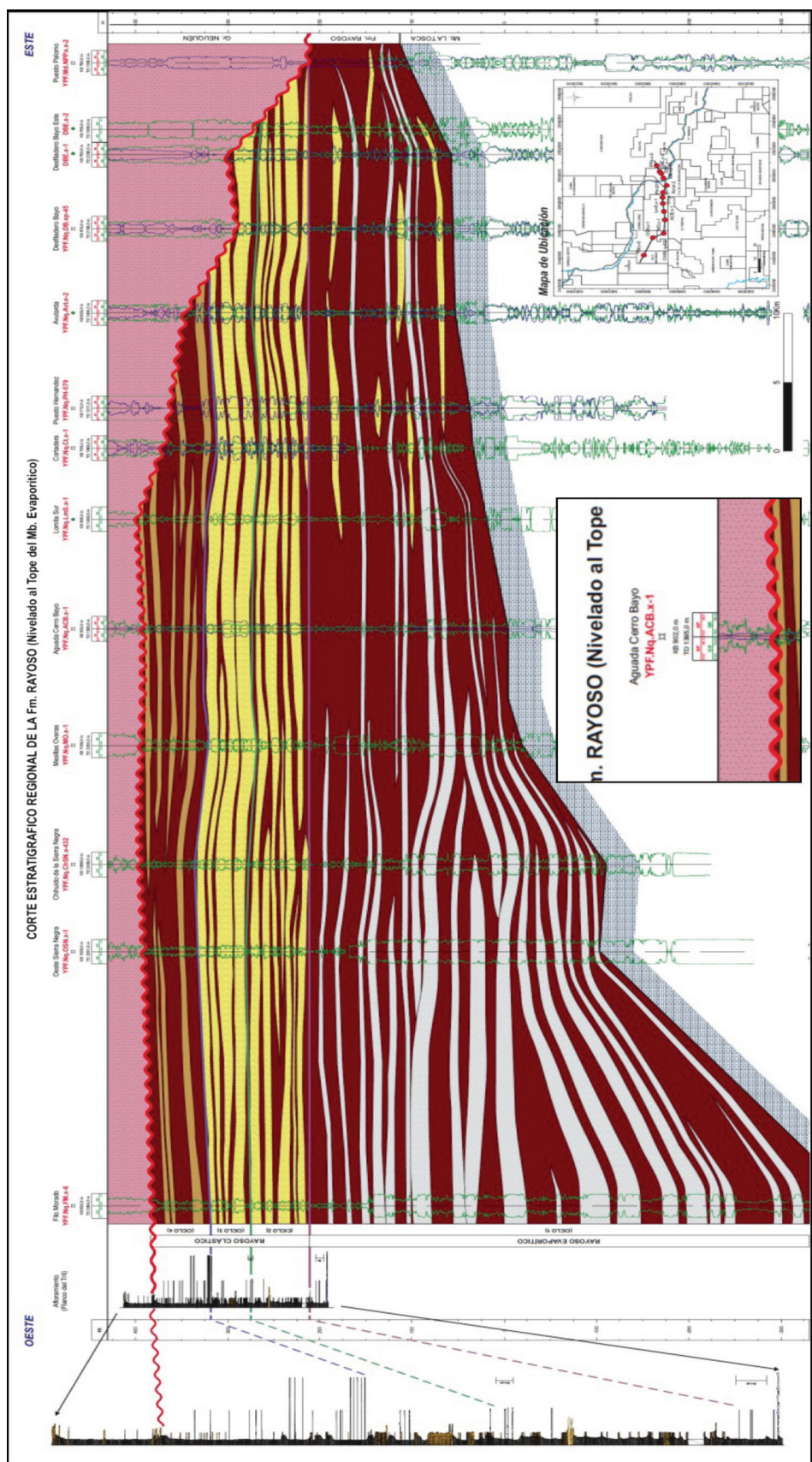


Figura 3. Sección estratigráfica W-E nivelada al tope del Mb Evaporítico y subdivisión adoptada a partir de la correlación de pozos con afloramientos en el ámbito de Filo Morado. Esta subdivisión se basa en la definición de "ciclos" limitados por superficies sellantes de carácter regional, reconocibles en pozos y permiten su mapeo sísmicamente. Mb Evaporítico = Ciclo 1 y Mb Clástico Ciclos 1, 2 y 3. Longitud aproximada de la sección. 70 kms.

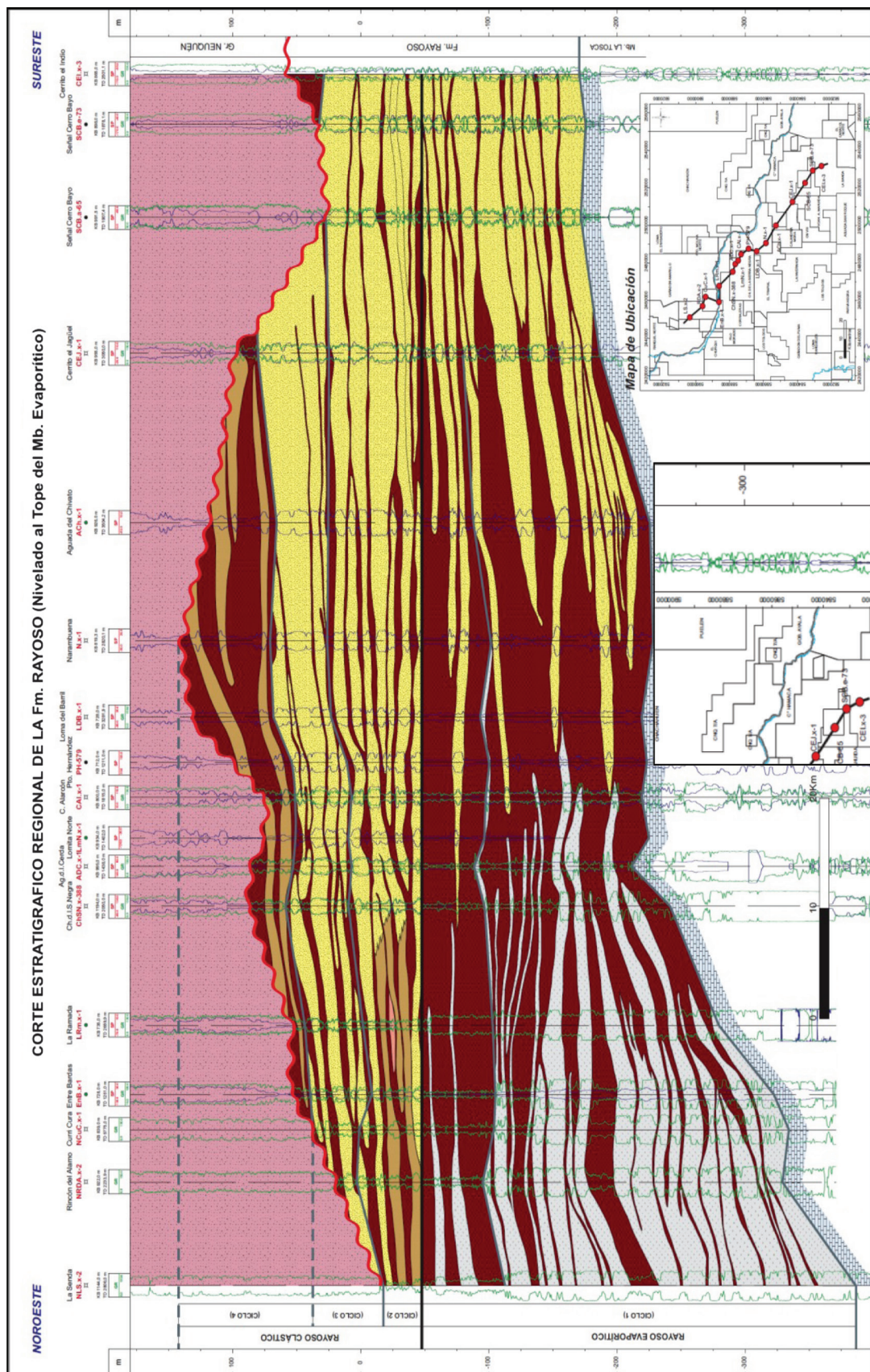


Figura 4. Sección estratigráfica SE-NE nivelada al tope del Mb Evaporítico. División de ciclos adoptada. Nótese la interdigitación de facies evaporíticas con clásticas hacia el SE, la actividad erosiva de la discordancia interseccionaria y la transición hacia facies más finas hacia el NW y niveles superiores (Ciclo4 Mb Clástico). Longitud aproximada de la sección. 110 kms.

El Ciclo 1 o Rayoso Evaporítico limita en la base con El Mb La Tosca de la Fm Huitrín y su techo se define por un intervalo pelítico regional sobre el que instala el primer ciclo arenoso de la sección clástica (Figuras 3 y 4).

Se caracteriza por ciclos de inundación y desecación muy marcados, generando progradaciones-retrogradaciones del sistema; siendo la secuencia de un ciclo la siguiente:

Desecación (depósitos evaporíticos) → Inundación (Progradación de sistemas arenosos y deposición de pelitas) → desecación (retrogradación de arenas e instalación nuevamente de niveles evaporíticos).

Su depocentro se ubica hacia el NW, donde las facies vuelven más evaporíticas e interdigita hacia el SE donde predominan las facies clásticas. Esto permite asumir dicha dirección como área de aporte general (Figuras 4 y 5).

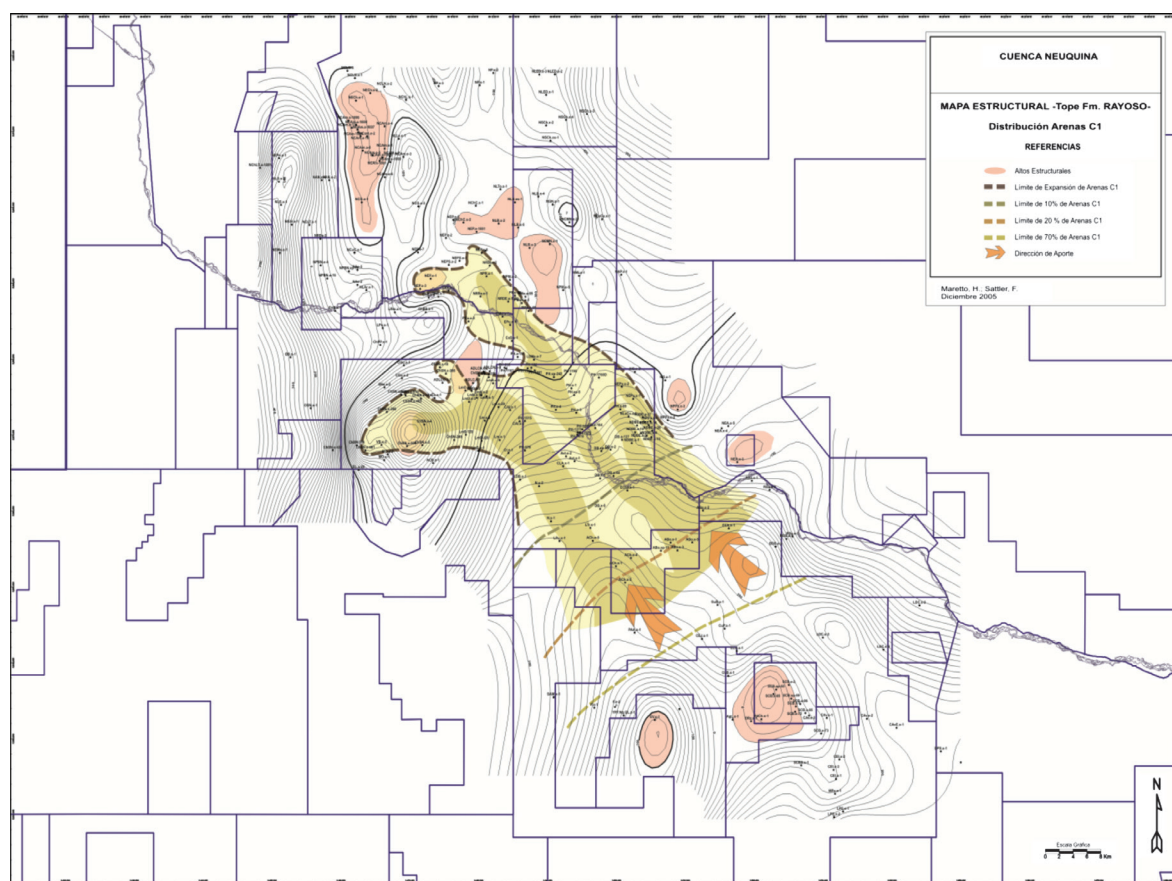


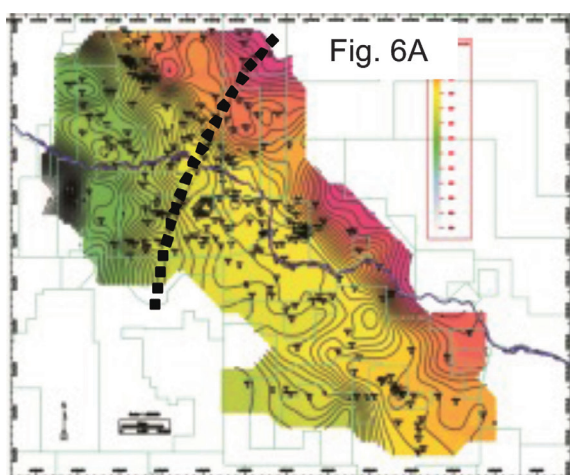
Figura 5. Mapa estructural a la discordancia intersenoniana (altos resaltados en rosa) al que se le ha sobreimpuesto la máxima expansión de las arenas del Ciclo 1 (esquemático línea de puntos) y relación arena-pelita en porcentajes 10, 20 y 70% de arena (líneas punteadas SW-NE). Nótese el incremento de arenas hacia el SE, de donde se asume el área de aporte.

Analizando los mapas isopáquico y de distribución de arenas (Figuras 5 y 6A) como las secciones esquemáticas (Figura 3), se observa un importante punto de quiebre para este intervalo.

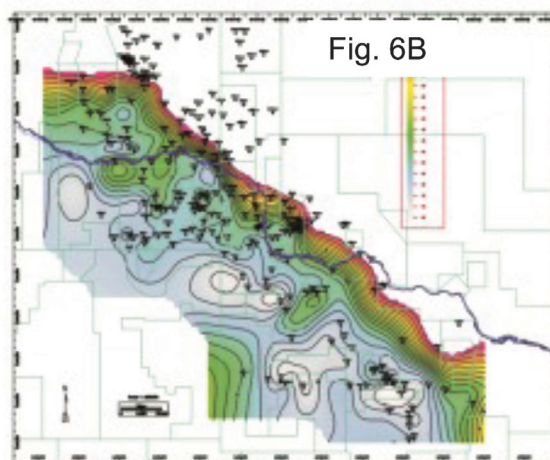
Hacia el N y W se desarrollan facies casi exclusivamente evaporíticas en tanto que hacia el S y E el intervalo gana rápidamente en contenido de arenas hasta ser superiores al 75% de la columna al SE del área Aguada del Chivato-Aguada Bocarey.

Es interesante el hecho de que esta interdigitación presente un punto de inflexión tan marcado, con poco solapamiento de facies y que sea coincidente con la posición a partir de la cual el espesor del tramo se incrementa sustancialmente.

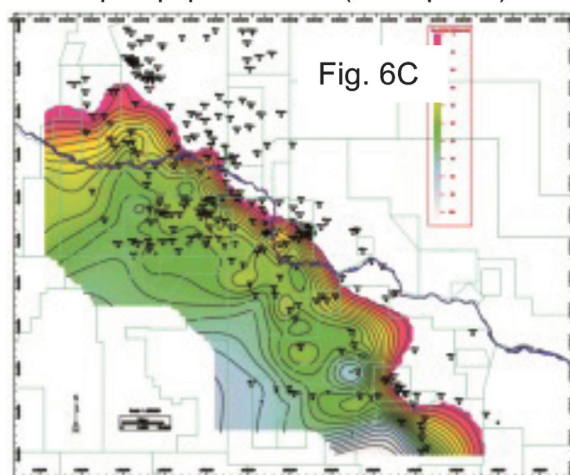
Este “quiebre” importante en la “plataforma” de Rayoso posee una sugestiva coincidencia con la gran falla de rumbo WSW-ENE que limita por el sureste el alto de Chihuido de la Sierra Negra, separa Agua de la Cerda al norte de Chihuido-Lomita Norte al sur y hace lo mismo con Puesto Molina y Puesto Hernández.



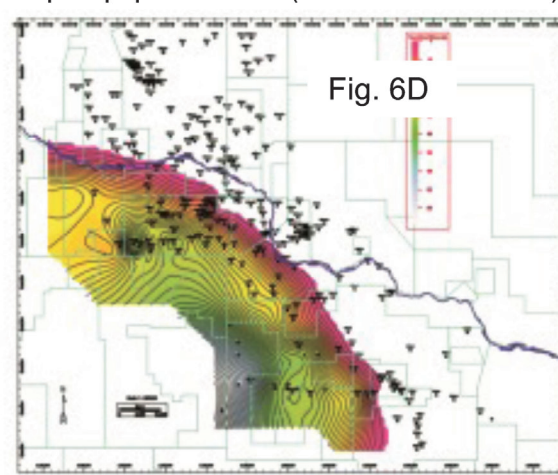
Mapa isopáquico del Ciclo 1 (Mb. Evaporítico)



Mapa isopáquico del Ciclo 2 (sección basal Mb. Clástico)



Mapa isopáquico del Ciclo 3 (sección media Mb. Clástico)



Mapa isopáquico del Ciclo 4 (sección superior Mb. Clástico)

Figuras 6 A-B-C-D. A: mapa isopáquico del ciclo 1 (Mb Evaporítico). B: mapa isopáquico del Ciclo 2 (Mb Clástico). C: mapa isopáquico del ciclo 3 (Mb Clástico). D: mapa isopáquico del Ciclo 4 (Mb Clástico). Nótese la erosión progresiva de la discordancia intersenoniana y la disminución de espesores hacia espolones NE-SW, posiblemente asociado a fallamiento activo.

En base la distribución de facies y espesores descripta, se postula que este lineamiento actuó como “pivot” durante la depositación del intervalo evaporítico, separando un depocentro con subsidencia tectónica hacia el NW y una “plataforma” más estable hacia el SE.

De la misma manera el importante arenamiento que se produce en este ciclo entre los pozos Aguada del Chivato y Cerrito el Jagüel, es coincidente con el pinchout de los Mbs Avilé, Troncoso y La Tosca, y el engranaje entre las Formaciones Agrio y Centenario.

Esta observación permite especular que la subsidencia estuvo en gran medida controlada por fallas escalonadas WSW-ENE.

Esta disposición y arreglo estratigráfico genera condiciones para que en el intervalo geográfico limitado por estos lineamientos se desarrollen trampas estratigráficas dadas por el pinch out de las progradaciones arenosas en el entorno pelítico/evaporítico (Figura 5).

Según este esquema, cualquier arena que en dirección de la progradación quede en contrapendiente con la estructura es una trampa potencial.

Hacia el SE, el mismo arenamiento determina la pérdida de los sellos laterales, por lo que las trampas quedarían solamente vinculadas a estructuras con cierre en las cuatro direcciones y gran relieve estructural.

A partir del intervalo pelítico que separa el Ciclo 1 del 2, se registra un importante cambio en el sistema depositacional.

Se observa una fuerte retracción del ambiente evaporítico y la sección clástica se extiende hacia todo el área del presente trabajo (Figuras 3 y 4).

En afloramiento se diferencian dos secciones dentro del Miembro Clástico: una inferior arenosa (Ciclos 2 y 3) y otra superior con predominio de material fino (Ciclo 4). Sin embargo desde el punto de vista genético, el intervalo basal puede dividirse en dos secuencias (ciclos) que se inician con bancos arenosos espesos a los que suceden otros bancos de menor espesor intercalados con niveles de fangolitas y pelitas; para finalizar hacia el techo en niveles pelíticos con carbonatos estromatolíticos, anhidritas y areniscas muy finas subordinadas.

Estos niveles superiores son los que tanto en afloramientos como en subsuelo han sido identificados como bancos guía (Figura 3), ya que se los puede seguir a lo largo de todos los perfiles. Dichos bancos son los sellos regionales y limitan secuencias de espesores del orden de 50 metros.

Esta división, además de su consistencia geológica, es beneficiosa desde el punto de vista práctico:

- Permite definir intervalos de espesor visible desde el punto de vista sísmico, favoreciendo su mapeo (Figura 7).
- Tiene buena correlación regional y a nivel de pozo (Figuras 8A, 8B y 8C).
- Posibilita el seguimiento y mapeo del elemento crítico de la “trampa Rayoso”: el sello, en especial cuando actúa como sello inferior.

- Dado el modelo geológico, la presencia de reservorio de calidad está asegurada y deja de ser un elemento crítico en el sistema petrolero.

Si bien es cierto que dentro de estos intervalos se pueden delimitar con el mismo criterio sets de parasecuencias progradantes-retrogradantes de mayor orden, que posiblemente resulte beneficioso a nivel de yacimiento, también lo es el hecho de que sus sellos serán de carácter local. Esto redundaría en acumulaciones de escaso tamaño.

A su vez, una división mayor no se contrapone en su ordenamiento dentro del marco aquí definido. Estos dos ciclos presentan una continuidad casi tabular en toda el área de estudio (Figuras 8 A y B).

El área de aporte sería nuevamente del sector SE y todo el sistema prograda hacia el NW, donde las arenas comienzan a ser de menor espesor, granulometría más fina y con mayor cantidad de niveles arcillosos (Figura 4).

Tal como sucediera con el Ciclo 1, esta situación de cambio se da aproximadamente en la misma posición geográfica que se detallara para el Mb Evaporítico, denotando nuevamente un posible control estructural, aunque en general presenta una menor subsidencia diferencial.

Esta subsidencia casi constante a lo largo de todo el ámbito geográfico, generó un espacio de acomodación menor y parejo con poca pendiente. Este hecho, en conjunción con el clima reinante, determinaron un sistema de depositación caracterizado por flujos episódicos y con alta carga de sedimentos.

Estas condiciones traen como consecuencia el desarrollo de cuerpos extensos, de geometría tabular, que claramente se distinguen en las secciones estratigráficas de las Figuras 3 y 4. Especialmente en este último, es bien clara la tabularidad ya que su orientación es casi perpendicular a la dirección de progradación. Nuevamente esto se ve reflejado en la sección sísmica ejemplo (Figura 7), ya que se distinguen reflectores paralelos y que mantienen su espesor sísmico.

A medida que nos desplazamos hacia el área de aporte, el apilamiento y participación arenosa es mayor, perdiéndose paulatinamente los sellos internos, lo que determina condiciones necesarias para el entrapamiento similares a las descriptas para el Ciclo 1 (Figura 4).

Si bien ambos ciclos poseen altos porcentajes de arena, los mayores apilamientos y progradaciones se registran en el Ciclo 3.

Finalmente, el Ciclo 4 se caracteriza por ser de predominio pelítico/fangolítico, con arenas finas de petrofísica pobre. Esta situación habría sido generada por una nueva dilución general del sistema, que resultara en un retroceso de las facies arenosas amalgamadas, las que podrían estar presentes en posiciones australes respecto a la zona de trabajo.

A consecuencia de esto, este intervalo constituye un importante sello para el Ciclo 3 y puede presentar cuerpos arenosos aislados dentro de una matriz fina generando entrapamiento en sí mismo.

Al igual que con los ciclos precedentes, una división interna más detallada es factible, pero

atento a los objetivos del trabajo y el menor interés petrolero que presenta esta sección, no se ha ahondado en detalles.

El límite superior está dado por la discordancia Intersenoniana que lo separa del Gr Neuquén y que actúa como sello lateral o superior de los diferentes ciclos de acuerdo al relieve erosionado.

## EVOLUCIÓN ESTRUCTURAL

Desde el punto de vista de su evolución estructural, tal cual lo sugerido en párrafos previos, la subsidencia inicial podría haber estado controlada por fallas, generando un importante depocentro al NW del área de estudio (Figuras 3 y 6A). Se estima que las mismas podrían haber tenido una orientación SW-NE.

Otra componente morfológica NW-SE, paralela y escalonada desde el borde de la cuenca parece estar dada por los altos de Entre Lomas-Cerrito el Indio-Señal Cerro Bayo-Puesto Hernández.

Estos altos pueden haber controlado o “canalizado” la dirección de aporte en sentido SE-NW, tal como se ve en la forma de expansión de las arenas del Ciclo 1 o la disminución de su espesor sobre los mismos (Figuras 5 y 6A).

El límite entre el intervalo evaporítico (Ciclo 1) y el clástico (Ciclo 2), marca un importante cambio, no solo desde el punto de vista sedimentológico/climático, sino tal vez tectónico.

Al parecer, durante este período estuvieron activas las fallas SW-NE, generando espolones con esa orientación que se superponen a los altos descriptos. Esto se puede observar en el mapa isopáquico del Ciclo 2 (Figura 6B), donde ya se esbozan los ejes Agua León-Señal Cerro Bayo; Aguada Chivato-Aguada Bocarey; Puesto Hernández-Lomitas-Chihuido de la Sierra Negra y el Pichanal-Entre Bardas.

La influencia de estos elementos morfoestructurales se va perdiendo secuencia arriba hasta ser casi imperceptible a nivel del Ciclo 4 (Figura 6D), el que casualmente, está caracterizado por una expansión de niveles pelíticos y dilución de todo el sistema.

La variación observada en el espesor de este último nivel, esta principalmente definida por la erosión generada por la Discordancia Intersenoniana.

En dicho momento se produce un importante levantamiento de toda la plataforma NE, la reactivación de los espolones SW-NE ya definidos y la inversión en el depocentro ubicado al Norte.

Este alzamiento de la plataforma y reactivación de las fallas ya mencionadas, se documenta no solo en el mapa isopáquico del Ciclo 4, donde se ve claramente que dicho nivel queda restringido a posiciones centrales de la cuenca, en forma paralela al borde; sino también en la forma de actuar de la discordancia en el Ciclo 3 (Figura 6C).

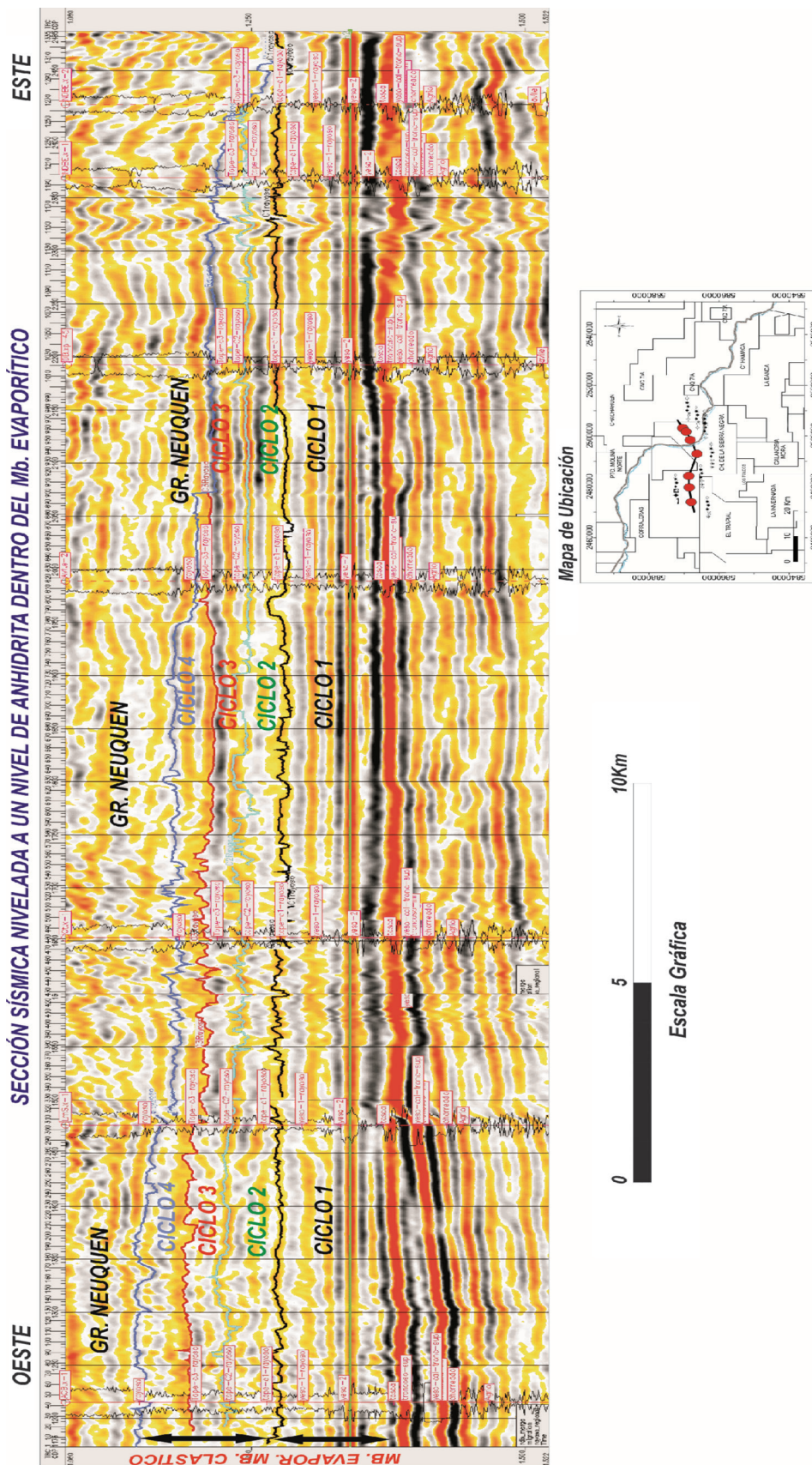
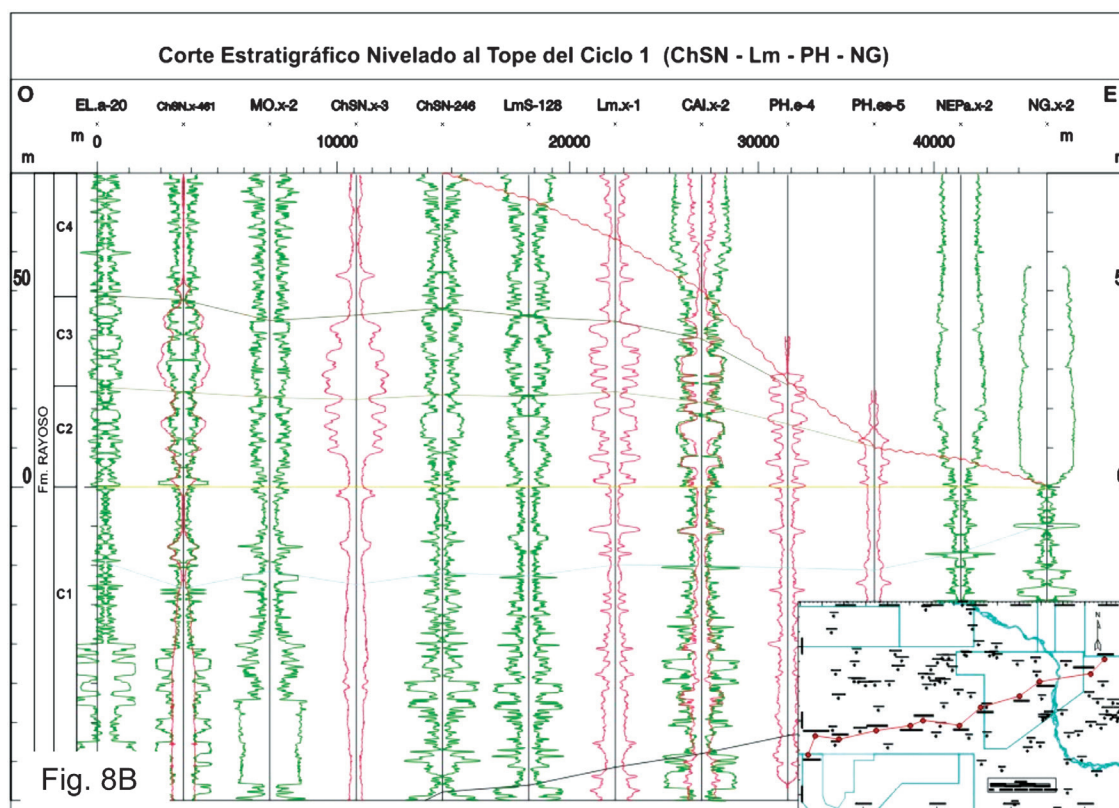
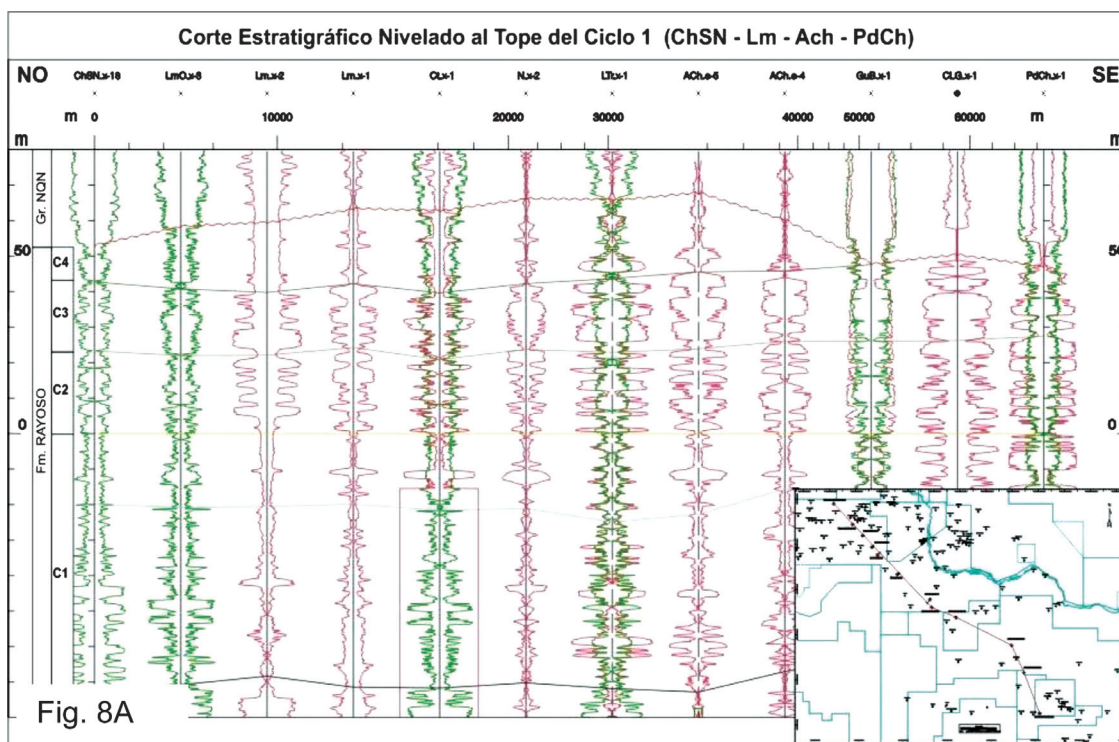


Figura 7. Sección sísmica E-W, donde se destaca la continuidad de los reflectores que representan los límites de los ciclos, su excelente amarre con los pozos y su tabularidad para el Mb Clástico. Esto redonda en una consistencia práctica del criterio de división adoptado y su posterior mapeo.



Figuras 8 A y B. Cortes estratigráficos nivelados al tope del ciclo 1 (Mb Evaporítico) Norte-Sur y Este-Oeste respectivamente. Nótese la consistencia regional del sistema de correlación adoptado y que se ve reflejado también en la sísmica de la Figura 7. Es clara la tabularidad local de cada uno de los ciclos, el carácter regional de los sellos y la acción erosiva de la discordancia intersenoniana.

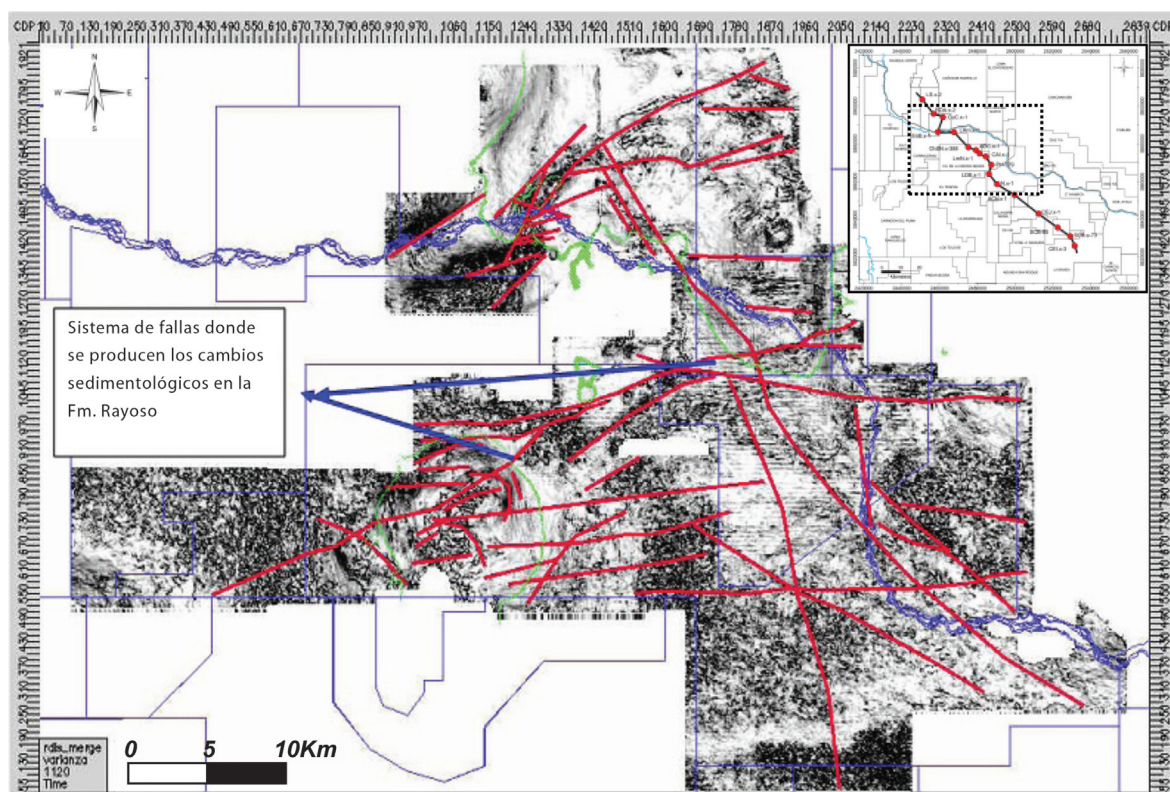


Figura 9. *Time slice* del cubo de varianza donde se identifican los dos juegos de fallas principales. Uno en sentido NW-SE y otro en sentido WSW-ENE. Este último es el que a la fecha ha mostrado capacidad sellante en varios casos.

Si se observa el mapa isopáquico de dicha unidad, se ve como se van desarrollando “engolfamientos erosivos” en sentido SW-NE, en posiciones de los viejos espolones (Señal Cerro Bayo; Pto. Hernández; El Pichanal) o erosionando totalmente el miembro clástico con la misma orientación en posiciones cercanas a Cerro Guillermo, Cañadón Amarillo (paralela al espolón de Loma del Medio).

Esta inversión/erosión del depocentro se puede visualizar esquemáticamente en el corte SE-NW de la Figura 4.

Muchas de estas fallas, revisten un carácter sellante tal cual lo observado en varios campos como Puesto Hernández o Puesto Molina.

Para aquellas con sentido NW-SE no es tan evidente su comportamiento como sello, aunque debido a su posición en general casi perpendicular a la pendiente regional es difícil que actúen como tal, especialmente por su extensión. Es decir, en los lugares donde pierde rechazo, siempre estarían en contacto las arenas, y el hidrocarburo seguiría migrando pendiente arriba.

Existen evidencias de inversión tectónica más reciente de estas fallas, al menos posterior al Gr Neuquén (Figura 10), lo que podría interpretarse como uno de los mecanismos para la rotura de sello y remigración de fluidos desde acumulaciones más profundas a los reservorios de la Fm Rayoso, ya que es necesario este timing para poder “vulnerar” los sellos que implican las evaporitas

de la misma unidad.

Esta etapa de fracturación, para actuar como vía de migración, debería ser distensiva; hecho que parece confirmarse por la actividad magmática registrada en este ámbito geográfico, característica de un ambiente extensional (Bermúdez y Delpino 2004).

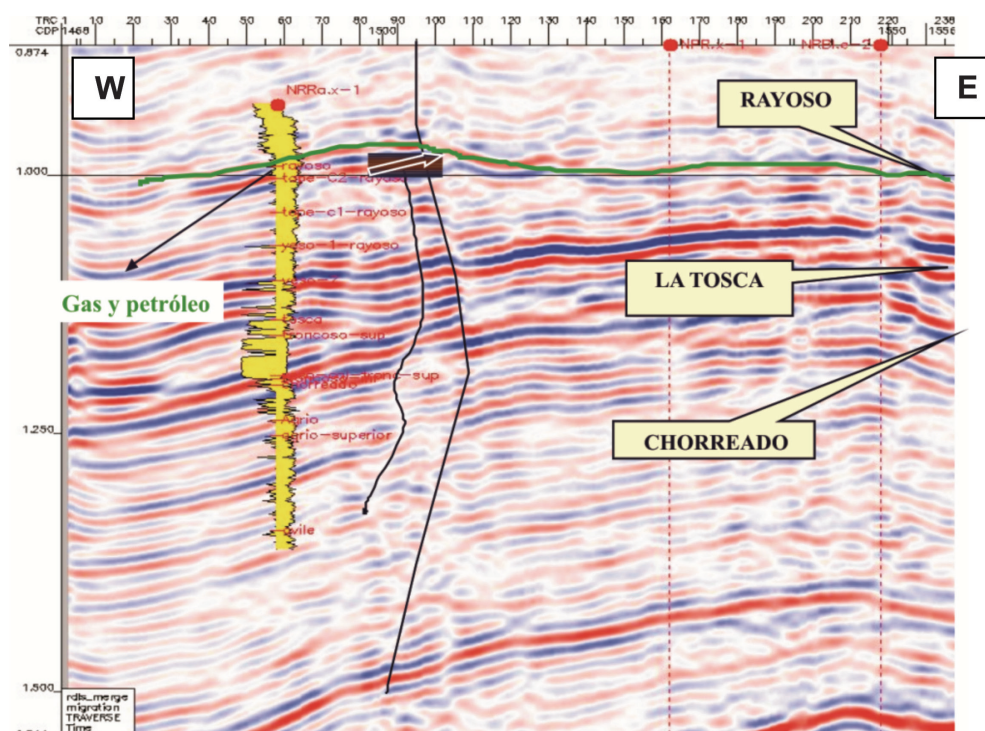


Figura 10. Sección sísmica E-W entre los pozos Rincón de la Ramada y Puesto Reyes. Nótese que la mayor erosión registrada sobre el alto (este de la falla), luego ocupa una posición menos elevada que la sección occidental donde se encuentra el pozo RRa.x-1. Esto denota la inversión estructural acaecida en tiempos al menos posteriores a la depositación del Gr Neuquén.

## MODELO DE ENTRAMPAMIENTO Y MIGRACIÓN

Si bien ya se han hecho especulaciones respecto a los mecanismos de migración, cabe discutir algunos conceptos.

En general las acumulaciones se localizan o se encuentran vinculadas a zonas donde se desarrollan campos petroleros en unidades más profundas.

Muchos de los petróleos se encuentran biodegradados y se han descrito en la literatura fracturas rellenas o tapizadas con bitúmenes (hasta superficie), lo que significa que éstas han actuado como escape de hidrocarburos.

El hecho de que afloren, significa que desde el punto de vista geológico son modernas, elemento ya documentado en ítems anteriores donde se hace referencia a la inversión estructural –

tectónica distensiva (por el tipo de magmatismo asociado) de fines del terciario.

En síntesis, todos estos elementos parecen indicar una remigración de los hidrocarburos a partir de acumulaciones/*carriers* más profundos a través de fallamiento reciente.

Si bien este mecanismo ha resultado eficiente, también permite, en conjunto con la estratigrafía, acotar zonas con mayor potencial.

De acuerdo a la distribución de yacimientos en unidades más profundas, la posibilidad de remigración se plantea geográficamente desde Aguada Bocarey, hasta Aguada de La Cerda-Puesto Hernández como la zona de mayor interés.

No solo la presencia de acumulaciones de petróleo en niveles subyacentes potencian el área, sino también la composición textural y litológica de las rocas existentes entre los reservorios o *carriers* y la Fm Rayoso.

Como hemos visto, es necesaria la presencia de fracturas para poder romper sellos eficientes como el Mb Toncoso Superior, o los mismos yesos del Mb Evaporítico de la Fm Rayoso. Si se asume como *carrier* para el petróleo generado en la Fm Vaca Muerta a la Fm Mulichinco, y el Mb Avilé o Troncoso Inf., para el generado en Agrio, es claro que el petróleo acumulado o migrando a través de estas unidades alcanzará los niveles superiores de la columna a través del fallamiento mencionado.

Ahora, si por ejemplo nos encontramos en una posición geográfica con un excelente desarrollo de arenas en facies “Centenario”, una vez alcanzados estos niveles, y dadas sus excelentes condiciones petrofísicas, el petróleo continuará por esta unidad hacia posiciones marginales de la cuenca sin alcanzar la Fm Rayoso.

De igual manera, si la sección basal de esta última unidad (Mb Evaporítico) está compuesta por un importante apilamiento de arenas, no encontrará el hidrocarburo sello lateral/superior hasta su acuñaamiento en el borde de cuenca, perdiendo sus posibilidades de entrapamiento.

Todas estas especulaciones, claro está, dejan de estar vigentes en estructuras cerradas en cuatro direcciones.

Contrariamente, si en el ámbito geográfico de la migración a través de fallas las facies desarrolladas son pelitas “Agrio”, “Tosca” impermeable o “Rayoso Evaporítico”, el hidrocarburo tendrá mayores chances de continuar su movimiento por la fractura hasta niveles superiores de la columna estratigráfica donde encuentre buenas rocas almacén (Ciclos 2 y 3 del Rayoso Clástico o niveles arenosos del Ciclo 1) para alojarse y/o continuar con su migración.

Como ejemplo de esto, puede citarse el gas y/o petróleo en el Gr Neuquén en Cañadón Amarillo. Los primeros niveles de reservorio de cierta calidad, son las arenas del Mb Candelero, ya que desde los niveles más profundos (Fm Agrio a Fm Rayoso) las facies son de mala calidad con predominio de pelitas, salvo saltuariamente arenas o calizas del Mb Chorreado o calizas permeables del Mb La Tosca, que de hecho, siempre presentan mineralización o en todo caso, rastros de hidrocarburo.

Resumiendo entonces, el área geográfica donde se presentan estas características (columna

subyacente con pocos o nulos reservorios), se restringe casi al mismo ámbito que el de las acumulaciones mencionadas. Es decir, hacia el NNO del eje Aguada del Chivato-Aguada Bocarey, ya que hacia el sur, no solo el Mb Evaporítico de la Fm Rayoso es netamente arenoso, sino que comienza a desarrollarse la Fm Centenario, perdiéndose sellos internos y laterales.

Con el objeto de simplificar la interpretación de los modelos de entrampamiento, se han realizado una serie de esquemas que se detallan en la Figura 11.

En general se pueden resumir en 5 los tipos de trampas, aunque en muchos casos se produce una combinación de 2 o más, sobre todo en lo referido a la presencia de fallas desvinculantes.

En orden de importancia de acuerdo a los volúmenes potenciales se las ha clasificado en:

TIPO I: Estructural + truncación por discordancia.

TIPO II: Estructural cierre en cuatro direcciones.

TIPO III: Acuñaamiento de arenas en entorno sellante.

TIPO IV: Cierre de permeabilidad por cambio de facies/interdigitación arena pelita.

TIPO V: Controlada por falla.

### **Trampa TIPO I: Estructural + truncación por discordancia.**

Es el entrampamiento más común y que ha resultado en las mayores acumulaciones.

La discordancia Intersenoniana trunca las capas arenosas de cualquiera de los ciclos pendiente arriba. El sello superior y lateral en sentido de la pendiente se debe principalmente a la discordancia. El sello inferior está dado por el límite de los ciclos o por los sellos internos de la unidad (Figura 10).

Lateralmente pueden actuar fallas o simplemente una cota estructural.

Puesto Hernández, Puesto Molina y Desfiladero Bayo Este representan este tipo de entrampamiento, en un modelo continuo de norte a sur.

Si bien la carga de Puesto Hernández o Puesto Molina se explica con el modelo de migración propuesto, para Desfiladero Bayo Este existen 2 posibles alternativas (o combinación de ambas), tal como se ve en el ejemplo de la Figura 11.

Aquí el petróleo pudo haber migrado por el *carrier* Troncoso hasta fallas que le permitieron su removilización hacia los niveles superiores o, muy posiblemente, la acumulación provenga de la remigración de petróleo del yacimiento Desfiladero Bayo que alcanzó los términos psamíticos de la Fm Rayoso hasta algún punto de fuga. Una vez que esto sucede, el petróleo se moviliza por diferencia de potencial o flotabilidad hacia el borde de cuenca hasta que encuentra la trampa por truncación de la discordancia Intersenoniana. Un hecho que podría avalar la hipótesis parece ser la ausencia de casquete de gas en este campo, situación que se da tanto en Desfiladero Bayo como en Puesto Hernández o Puesto Molina, ya que el fluido “derramado” lógicamente sería petróleo ya que es desplazado por el gas.

**Trampa TIPO II: Estructural cierre en cuatro direcciones.**

Esta trampa es de índole clásica y adquiere importancia en posiciones surorientales donde se pierden sellos. Su cierre lateral es altamente dependiente del relieve estructural.

Cualquier fallamiento actuaría en desmedro de la acumulación ya que si los sellos son de escaso espesor este hecho redundaría en pequeñas acumulaciones no mayores a ese mismo espesor, pudiendo en muchos casos, poner en contacto arena con arena destruyendo totalmente la trampa.

Aguada de la Cerda-Puesto Castillo, o el mismo Chihuido de la Sierra Negra, de existir, serían ejemplos de este modelo.

Este tipo de trampa parece ser la actuante en Volcán Auca Mahuida y tal vez con un componente estratigráfico (discordancia-cambio de facies), en Señal Cerro Bayo.

**Trampa TIPO III: Acuñaamiento de arenas en entorno sellante.**

Este sería el modelo principal de entrapamiento para el Ciclo 1.

Cada uno de los niveles psamíticos permeables que se acuñan pendiente arriba en el entorno pelítico característico del Mb Evaporítico constituye una trampa en sí mismo.

Los sellos superior e inferior están dados por las facies finas circundantes, en tanto que el lateral pendiente arriba estaría dado por el acuñaamiento de la arena o su deterioro como roca reservorio en posiciones más distales.

En muchos casos este tipo de entrapamiento se halla estrechamente vinculado a fallamiento, ya que cualquier desplazamiento, al ser las capas de arena de menos de 10 metros de espesor, rápidamente quedarían en contacto niveles de arena con pelita, las que son dominantes en el entorno.

Ejemplo de esto puede ser el caso de Chihuido de la Sierra Negra-Lomita-El Trapial.

Aquí también se especula que fallas habrían roto el sello que representa el Mb Troncoso Superior, y llevado petróleo del Mb Troncoso Inferior a los niveles arenosos del Ciclo 1. Muchas de estas fallas luego de actuar como vía de migración, podrían transformarse en sello si han quedado tapizadas con residuo bituminoso que ocluya el espacio poral.

Es de destacar, que dada la génesis de los depósitos arenosos del Ciclo 1 (flujos episódicos que en momentos de desecación serían escasos), cada capa arenosa puede constituir un reservorio aislado en sí mismo y de escasa extensión.

**Trampa TIPO IV: Cierre de permeabilidad por cambio de facies / interdigitación arena pelita.**

Si bien este modelo de entrapamiento se encuentra estrechamente vinculado con el TIPO III, en general la pérdida de propiedades petrofísicas de las arenas es un elemento característico del Ciclo 4 (tope de la Fm Rayoso), (Figuras 3 y 4).

En todo caso valen las consideraciones del tipo de trampa anterior, donde lateralmente el sello dentro de una misma capa o secuencia podría estar dado por la pérdida de las propiedades petrofísicas.

Esto podría suceder en los casos de Chihuido de la Sierra Negra, Aguada de La Cerda y Don Ruiz, donde la mineralización se encuentra en el Tope de la unidad, en pequeñas capas y su sello occidental parece estar dado por la pérdida de porosidad.

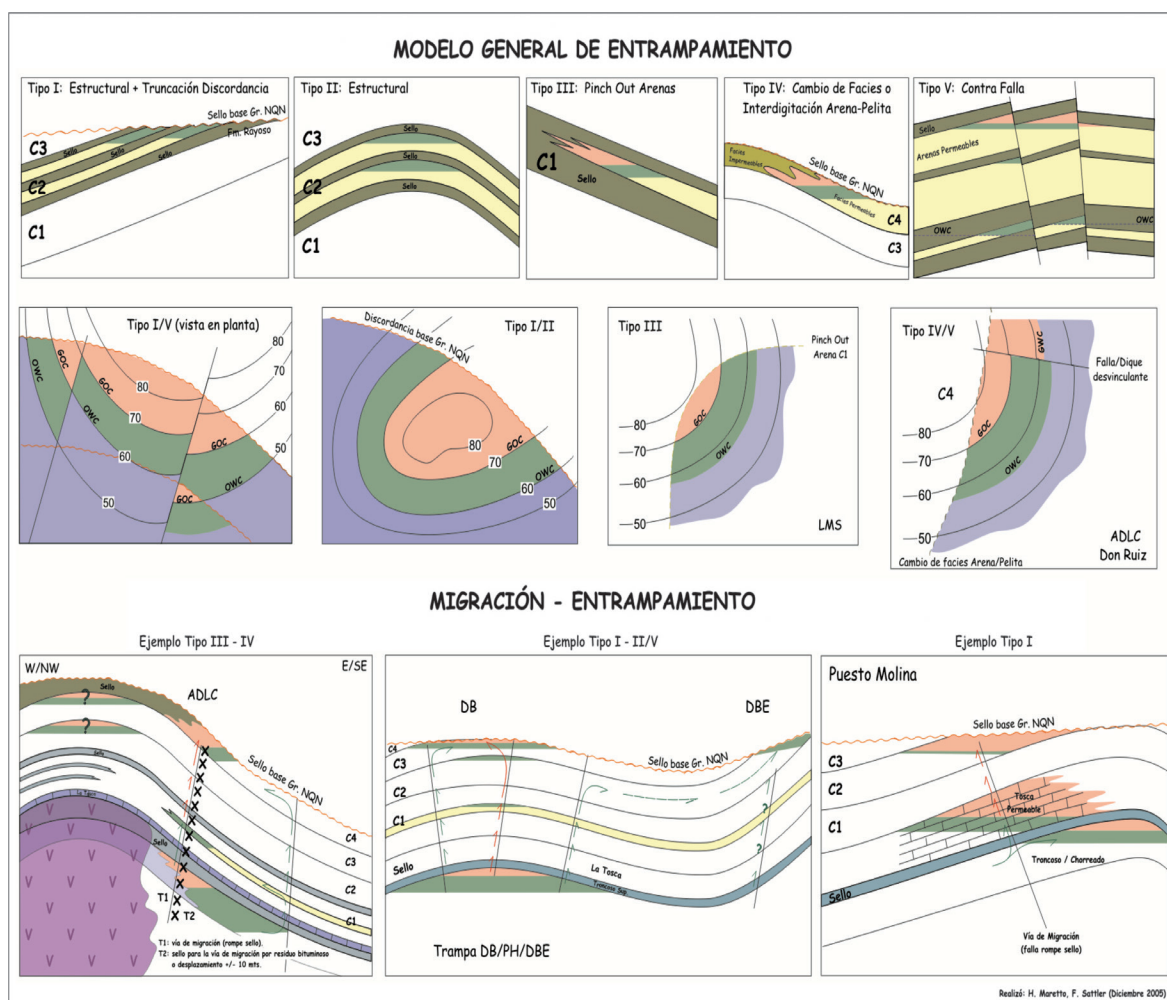


Figura 11. Modelo general de migración y entrapamiento para la Fm Rayoso y ejemplos conocidos. LMS: Lomita Sur, DB: Desfiladero Bayo, DBE: Desfiladero Bayo Este, PH: Puesto Hernandez, ADLC: Agua de la Cerda; PM: Puesto Molina.

## Trampa TIPO V: Controlada por falla.

Si bien constituye el modelo de trampa más conspicuo y difícil de detectar, en mayor o menor medida se encuentra combinado con los cuatro que le preceden.

No se conoce hasta el momento ejemplo exclusivo de este tipo de entrapamiento, y su concepción es netamente conceptual.

El hecho de que se trate de capas superficiales y con espesores pequeños, en general dificulta su interpretación a partir de la sísmica, siendo muy común la delimitación de fallas por los contactos observados entre pozos.

Si el medio es muy arenoso y los sellos de escaso espesor, pequeños desplazamientos actuarán en desmedro de la acumulación poniendo en contacto arena con arena. Por el contrario, si el entorno es pelítico y las capas psamíticas de escaso espesor, impedirán la llegada de hidrocarburos a todo el cuerpo, dejando lugares de “sombra” en sentido de la migración.

Sumada a esta situación, su capacidad sellante/no sellante, parece no sólo estar vinculada a las litologías que pone en contacto, sino también a la presencia de petróleo sólido, tal cual se ha documentado en Puesto Hernández y Chihuido de la Sierra Negra.

De todas maneras, en función de lo observado en Puesto Molina, Puesto Hernández y Desfiladero Bayo, se ha determinado que muchas de las fallas con rumbo NE-SW actúan como sello (independientemente del motivo).

Para aquellas con sentido casi N-S, existen indicios que en algunos casos podrían desvincular bloques, aunque es menos claro que en el caso de las anteriores.

Dado que en general el rechazo es ínfimo (al menos menor a la resolución sísmica), aquellas fallas que se encuentren perpendiculares a la pendiente regional, tendrían escasas chances de constituir sellos, o en todo caso implican acumulaciones pequeñas, ya que serían fácilmente “desbordadas” por el hidrocarburo en su migración pendiente arriba.

Al analizar toda la información aquí presentada, es evidente que la componente estratigráfica-truncación es el modelo de entrapamiento que ha resultado en las mayores acumulaciones, es decir trampas tipo I.

A partir de la combinación de mapas estructurales e isopáquicos (representan la posición de la discordancia y los sellos), se puede lograr la identificación de aquellos lugares geográficos con posibilidad de encontrar condiciones favorables para el entrapamiento, en especial de las trampas tipo 1 y 2, consideradas de mayor potencial (Figuras 5 y 12).

Para las trampas tipo 3 y 4 (Ciclo 4), al ser de carácter con dominio estratigráfico, a la estructura es necesario combinarla con mapas isolíticos/% arena-arcilla, como el ejemplo de la Figura 5, para poder visualizar los posibles acuanamientos contrapendiente y/o la pérdida de sello por arenamiento de la secuencia.

Ya para las trampas tipo 5 (fallas), es necesaria una interpretación sísmica de detalle.

Sintéticamente, en la Figura 10, se ejemplifica la identificación de trampas tipo I al combinarse un mapa isopáquico del Mb Clástico (posición de la discordancia) y secciones sísmicas en

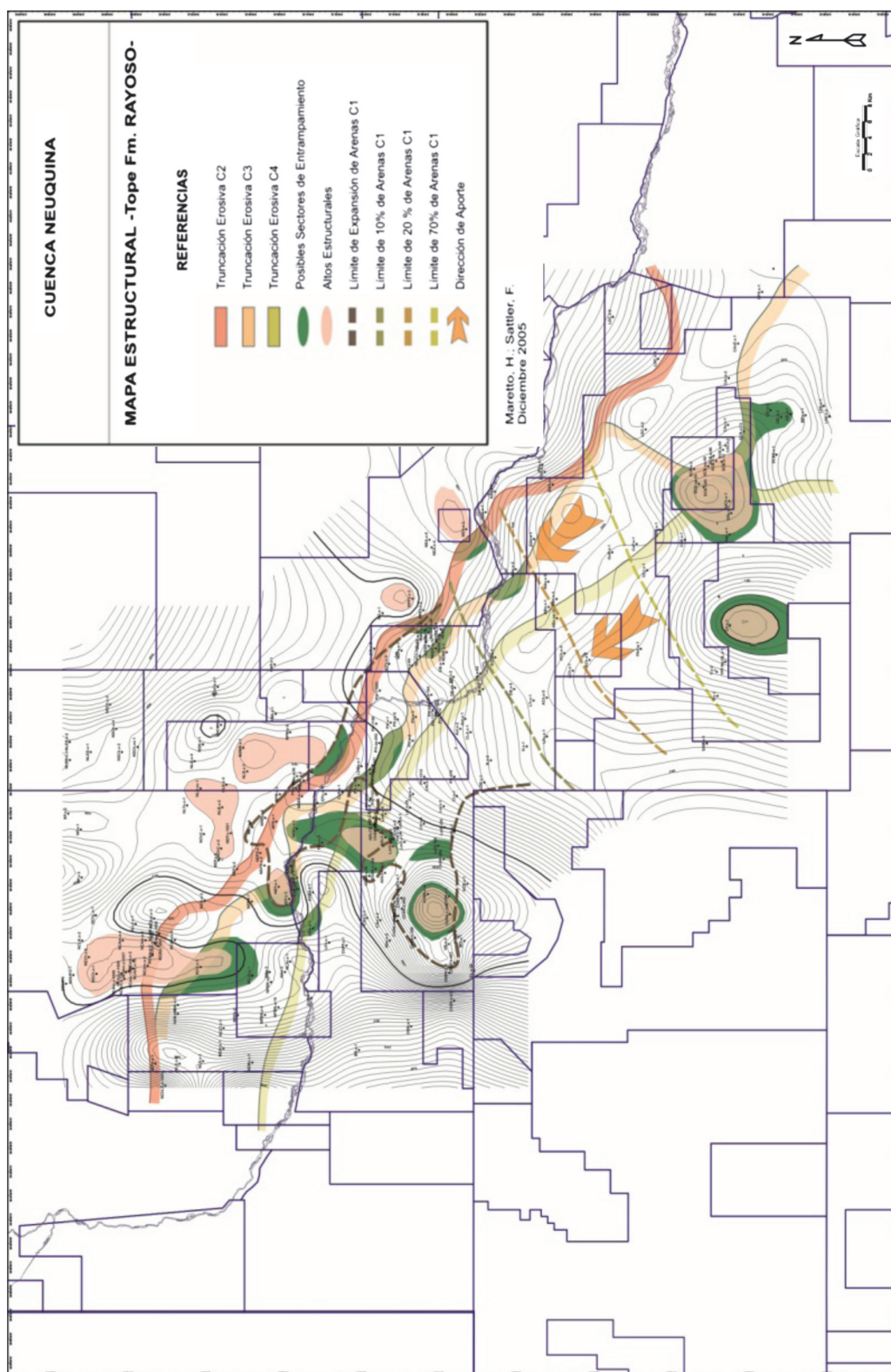


Figura 12. Mapa estructural al Tope de la Fm Rayoso, donde se destacan la expansión y porcentajes de arena del ciclo 1, y la posición relativa de la truncación de los Ciclos 4, 3 y 2 del interior de cuenca hacia la plataforma. Se resaltan los espolones y altos estructurales que pueden resultar en zonas prospectables en conjunción con la posición de las discordancias.

distintas posiciones geográficas de toda el área de estudio que avalan el modelo planteado.

Si bien ésta es una forma indirecta de identificar áreas potenciales, su exacta definición deberá realizarse a través de un mapeo minucioso utilizando información sísmica 3D. Esto permitirá tener una correcta configuración estructural para cada ciclo y mapas isopáquicos más ajustados.

Como licencia final, nos permitimos especular sobre algunas situaciones planteadas de índole práctica, como lo son presencia de perfiles muchas veces con “resistividad” de hidrocarburos, o coronas/recortes de perforación impregnados de petróleo que resultan en producciones de agua.

En muchos casos puede tratarse de petróleo “residual” dejado por el hidrocarburo en su migración.

El hecho de que en muchos casos se trate de petróleos viscosos y reservorios con baja presión, favorecen la situación de falta de flotabilidad/energía, ya sea para desplazar totalmente el agua en el llenado o removilizar el hidrocarburo si se produce un vaciamiento de la trampa.

Otro elemento que puede enmascarar la resistividad, es el cambio de salinidad del agua, la que por su misma densidad, y nuevamente dada la falta de presión, teóricamente podría ser más dulce a medida que se sube estructuralmente en la trampa, denotando de todas maneras, un sistema no equilibrado.

Esta situación puede darse por una migración muy reciente, y debería reflejarse en variaciones de presión dentro de un mismo reservorio.

## CONCLUSIONES

-Se dividió a la unidad en 4 ciclos. El Ciclo 1 corresponde al Mb Evaporítico, en tanto que los Ciclos 2, 3 y 4 pertenecen al Mb Clástico.

-Los Ciclos 2 y 3 son los que revisten mayor interés petrolero dado que son los que contienen los principales reservorios; en tanto que el Ciclo 4 presenta arenas de propiedades petrofísicas discontinuas y es en general un buen sello.

-Los límites entre ciclos representan sellos continuos de carácter regional, tanto en afloramiento como en subsuelo.

-Cada ciclo tiene un espesor promedio de 50 metros y puede seguirse sísmicamente, lo que posibilita un mapeo más ajustado.

-Se definieron 5 modelos de entrapamiento:

TIPO I: Estructural + truncación por discordancia

TIPO II: Estructural cierre en cuatro direcciones

TIPO III: Acuñaamiento de arenas en entorno sellante

TIPO IV: Cierre de permeabilidad por cambio de facies / interdigitación arena pelita

TIPO V: Controlada por falla

-El TIPO I es el de mayor importancia y su identificación es sencilla a partir de la combinación de mapas isopáquicos de ciclos vs. estructurales de la discordancia Intersenoniana. Mapas de amplitud en ventanas debajo de la base del Gr Neuquén son excelentes métodos de mapeo de truncaciones.

-El arenamiento de todas las secuencias hacia el sector SE implica una pérdida de sellos. Por lo tanto, se torna crítico un modelo de trampa netamente estructural TIPO II.

-Para el ciclo 1 el modelo de entrampamiento TIPO III es de gran potencial ya que cualquier arena que en dirección de la progradación quede en contrapendiente con la estructura es una trampa potencial. De la misma manera, dada la existencia en este nivel de capas discontinuas, cada una de las mismas puede constituir una trampa netamente estratigráfica.

-Las trampas TIPO IV parecen ser características del Ciclo 4.

-Para la identificación de trampas tipo I, II y V, es necesario mapas estructurales e isopáquicos; en tanto que para las tipo III y IV se recomiendan mapas de porcentaje de arena, relación arena/pelita o n° de cuerpos arenosos por intervalo, combinado con mapas estructurales.

-El fallamiento SW-NE actúa como desvinculante en muchas ocasiones generando compartimentalización del reservorio.

Si el medio es muy arenoso y los sellos de escaso espesor, pequeños desplazamiento actuarán en desmedro de la acumulación poniendo en contacto arena con arena. Por el contrario, si el entorno es pelítico y las capas psamíticas de escaso espesor, impedirán la llegada de hidrocarburo a todo el cuerpo, dejando lugares de “sombra” en sentido de la migración.

-Las fallas distensivas terciarias habrían actuado como vías de migración desde acumulaciones más profundas. Por este motivo, la presencia de yacimientos en unidades subyacentes a la Fm Rayoso, potencian notablemente las posibilidades de encontrar hidrocarburos en esta última.

## REFERENCIAS CITADAS

- Bermúdez, A. & D. Delpino, 2004, Estudio de la influencia de las rocas ígneas (filones capa y diques) sobre la Fm Agrio. Sistemas hidrotermales asociados, Comunicación de resultados, Informe Interno inédito YPF.
- Groeber, P., 1946, Observaciones geológicas a lo largo del meridiano 70°, Hoja Chos Malal, RAGA, (1) N°3, Bs. As.
- Herrero Ducloux, A., 1946, Contribución al conocimiento geológico del Neuquén extraandino, Boletín de informaciones petroleras 23 (226), p. 245-281, Bs. As.
- Legarreta, L., 1985, Análisis estratigráfico de la Fm Huitrín (Cretácico Inferior), Provincia de Neuquén. Tesis doctoral inédita, UBA, 247 pp.
- Legarreta, L. & A. Boll, 1982, Formación Huitrín. Análisis estratigráfico y esquema prospectivo, Informe inédito YPF.

- Marteau, V. & M. Olmos, 2005, "Yacimiento Puesto Hernández", en E. Kozlowski, G. Vergani y A. Boll, eds., Las Trampas de Hidrocarburos en las Cuencas Productivas de Argentina, Simposio del VIº Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, IAPG, p.163-171, Buenos Aires.
- Olea, G., D. Mallimaci, L. Cortés, G. Vinales y L. Álvarez, 2002, Informe de la Fm Rayoso - sección clástica, Informe inédito YPF.
- P&T consultora S.R.L., 2002, Facies y Arquitectura sedimentaria de rayoso clástico, Informe inédito YPF.
- Pereyra, C. & J. Márquez, 1984, Las Formaciones Rayoso y Huitrín, su importancia geominera en el área de Rincón de los Sauces, Provincia de Neuquén, IXº Congreso Geológico Argentino, San Carlos de Bariloche.
- Zavala, C. & J. Ponce, 2011, La Formación Rayoso (cretácico temprano) en la cuenca neuquina, Relatorio del XVIII congreso geológico argentino, Geología y recursos naturales de la Provincia del Neuquén, p. 205-222, Neuquén. Argentina.