

Universidad Nacional de San Juan  
Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales  
Departamento de Geofísica y Astronomía

**Trabajo Final de Licenciatura en Geofísica**

***“Interpretación sísmica y reconocimiento de una intrusión magmática en el Intervalo Quintuco-Vaca Muerta, Área Bandurria, Provincia de Neuquén”***

**Alumno:** Federico González

**Asesor:** Lic. Martín Cevallos

**Co-Asesor:** Lic. Silvia Tejada

Argañaraz

San Juan

Año 2015

Universidad Nacional de San Juan  
Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales  
Departamento de Geofísica y Astronomía

**Trabajo Final de Licenciatura en Geofísica**

***“Interpretación sísmica y reconocimiento de una intrusión magmática en el Intervalo Quintuco-Vaca Muerta, Área Bandurria, Provincia de Neuquén”***

**Tribunal examinador:**

Ing. Raúl Sarmiento: .....

Dr. Ing. Armando Imhof: .....

Lic. Arturo Güell: .....

Calificación: .....

**Alumno:** Federico González

**Asesor:** Lic. Martín Cevallos

**Co-Asesor:** Lic. Silvia Tejada

Argañaraz

San Juan

Año 2015

## **Agradecimientos**

- A mi mamá Anita y a mis hermanas Florencia y Ana Paula, por brindarme todo su cariño y apoyo durante estos años.
- A mi papá Oscar por apoyarme y brindarme toda su ayuda en esta etapa.
- A mi abuela Juana, a mis tíos, tías y primos por darme todo su afecto y por estar incondicionalmente en estos momentos tan importantes.
- A Lucía, por su amor, su ternura y su comprensión.
- A mis amigos y a mis hermanos del Movimiento de la Palabra por los maravillosos momentos compartidos y su constante aliento.
- A Martín Cevallos por su paciencia y sus sabias enseñanzas.
- A Silvia Tejada por su colaboración desinteresada durante este trabajo.
- A todo el equipo docente de la Licenciatura en Geofísica de la FCEFYN-UNSJ por formarme durante mi etapa universitaria; como así también al personal del Dpto. de Geofísica y Astronomía de esta casa de altos estudios.
- A mis compañeros por todos los momentos y vivencias compartidas durante la Carrera.
- Y finalmente a Dios, por todos los logros académicos y personales obtenidos en estos años de mi vida, y por haber sido la luz que guió mi camino.

# ÍNDICE

<b>1 RESUMEN</b>	<b>6</b>
<b>2 INTRODUCCIÓN</b>	<b>7</b>
2.1 Objetivos	7
2.2 Revisión teórica del método sísmico y Estado del Arte	8
2.3 Zona de estudio: generalidades y ubicación	15
<b>3 GEOLOGÍA REGIONAL Y DEL AREA DE ESTUDIO</b>	<b>17</b>
3.1 Cuenca Neuquina	17
3.1.1 Historia geológica	20
3.1.1.1 Estratigrafía	20
3.1.1.2 Geología estructural	21
3.2 Geología local	24
3.2.1 Marco estratigráfico	24
3.2.1.1 Intervalo Quintuco-Vaca Muerta	26
3.2.1.2 Intrusivo Loma de Las Yeguas	27
3.2.2 Marco estructural	27
3.2.3 Sistema petrolero	28
<b>4 METODOLOGÍA DE TRABAJO</b>	<b>30</b>
4.1 Introducción y Geofísica del área	30
4.2 Software	30
4.3 Creación del proyecto de trabajo y carga de datos sísmicos	31
4.4 Carga de datos de pozo	34
4.5 Interpretación de horizontes guía	39

4.6	Sismogramas sintéticos: vinculación de los datos de pozo con la sísmica de reflexión	40
4.7	Correlación entre los pozos	43
<b>5</b>	<b>DESCRIPCIÓN ESTRUCTURAL DEL INTERVALO QUINTUCO-VACA MUERTA</b>	<b>47</b>
5.1	Base de Vaca Muerta (BVM) y Tope de Quintuco (Top QCO)	47
5.1.1	Mapa isopáquico del Intervalo Quintuco-Vaca Muerta	54
5.2	Horizontes Intra Quintuco 1 (Intra QCO 1) e Intra Quintuco 2 (Intra QCO 2)	56
5.3	Geoformas sigmoidales	62
<b>6</b>	<b>ANÁLISIS SÍSMICO DEL CUERPO INTRUSIVO “LOMA DE LAS YEGUAS”</b>	<b>64</b>
6.1	Antecedentes	64
6.2	Descripción estructural	67
6.3	Análisis de la distribución de espesores	71
<b>7</b>	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>75</b>
<b>8</b>	<b>APÉNDICE</b>	<b>77</b>
8.1	Efecto Tuning	77
<b>9</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>80</b>

# 1 RESUMEN

El presente trabajo tuvo como objetivo principal la interpretación de datos de subsuelo (sísmica de reflexión y perfiles de pozos) provenientes del área Bandurria, en la Cuenca Neuquina. Mediante la interpretación de dichos datos se buscó generar mapas estructurales en tiempo, mapas de espesores en tiempo y mapas de amplitudes que permitieran caracterizar los rasgos más importantes de las Formaciones Vaca Muerta y Quintuco (a partir de ahora Intervalo Quintuco-Vaca Muerta), en particular un cuerpo ígneo que intruye dichas formaciones (filón Loma de Las Yeguas).

El área de estudio, se encuentra ubicada en la parte central de la Cuenca Neuquina, dentro del sector denominado “Engolfamiento Neuquino”. Geográficamente el área, de unos 460 km<sup>2</sup> se encuentra en el departamento Añelo de la provincia de Neuquén y dista unos 120 km en dirección N-NO de la capital provincial.

Este trabajo se llevó a cabo en las dependencias del Gabinete de Geociencias Aplicadas a la Exploración y Producción de Hidrocarburos (GGAEPH), dependiente de los Departamentos de Geología y Geofísica y Astronomía de la FCEFyN. Los datos que se utilizaron fueron provistos por la Subsecretaría de Minería e Hidrocarburos de la Provincia de Neuquén bajo acuerdo de confidencialidad con el GGAEPH.

Para poder llevar a cabo el trabajo se contó con información sísmica de reflexión correspondiente al cubo sísmico 3D “Bandurria”, como así también con registros eléctricos de 3 pozos ubicados en la zona y perforados por YPF. Toda esta información fue manipulada a través del software IHS Kingdom. El mismo es un programa de amplio uso en la industria petrolera, diseñado especialmente para la interpretación de sísmica 2D y 3D, como así también para el manejo de la información proveniente de los pozos perforados.

La realización de este trabajo fue de suma utilidad ya que permitió adquirir conocimiento y trabajar con datos de una zona de gran riqueza hidrocarburífera a nivel mundial, como lo es la Cuenca Neuquina. Además se destaca el adiestramiento adquirido en la manipulación de datos geofísicos usados para la exploración de hidrocarburos, como así también el uso de un software especialmente diseñado para tal fin.

## **2 INTRODUCCIÓN**

### **2.1 Objetivos**

#### **General**

- El principal objetivo que se persigue es aplicar todos los conocimientos teórico-prácticos adquiridos durante el cursado de la Carrera para, en conjunto con las herramientas pertinentes, poder elaborar el Trabajo Final que posibilite la obtención del título de “Licenciado en Geofísica”.

#### **Específicos**

- Identificar horizontes sísmicos claves para efectuar una correcta interpretación estructural del área.
- Reconocer estructuras y rasgos geológicos a través de la visualización de líneas sísmicas (Inlines y Crosslines).
- Vincular la información de datos de perforaciones en la zona de trabajo con la sísmica de superficie.
- A partir de los horizontes interpretados generar mapas estructurales en tiempo, mapas de espesores en tiempo y mapas de extracción de amplitudes.
- Analizar los mapas elaborados y a partir de ellos describir el comportamiento de los horizontes y las estructuras geológicas visualizadas.
- Estudiar la respuesta sísmica de los cuerpos ígneos intrusivos y su importancia como posibles reservorios de hidrocarburos.
- Adquirir adiestramiento en el manejo de datos sísmicos 2D y 3D, y datos de pozos mediante el uso del software IHS Kingdom.

## 2.2 Revisión teórica del método sísmico y Estado del Arte

A continuación se hace una breve reseña del método sísmico de reflexión en base a Herrera *et al.* (2010).

La sísmica de reflexión es el método geofísico más usado a nivel mundial para la exploración de hidrocarburos. Dicho método puede aplicarse en tres tipos de ambientes: marino, terrestre y zonas de transición. El presente análisis de las prácticas actuales a nivel mundial cubre solamente el aspecto terrestre.

En el método sísmico se utiliza una fuente de energía impulsiva o vibratoria para generar las ondas elásticas que se propagan hacia el subsuelo pasando por capas de rocas que poseen propiedades físicas y litológicas de interés. Las ondas experimentan una partición de energía cada vez que encuentran a su paso una interfase entre dos capas con velocidades y densidades diferentes; una parte de la energía se transmite y otra se refleja. La energía que se refleja forma el campo de ondas que contiene información de las amplitudes, longitudes de onda, fases y tiempos dobles de los reflectores del subsuelo. Cuando estos campos de onda llegan a la superficie son captados por instrumentos de escucha llamados en general geófonos y esta información se almacena en forma digital en cintas o discos duros en los equipos de registro del sismógrafo (Figura 1).

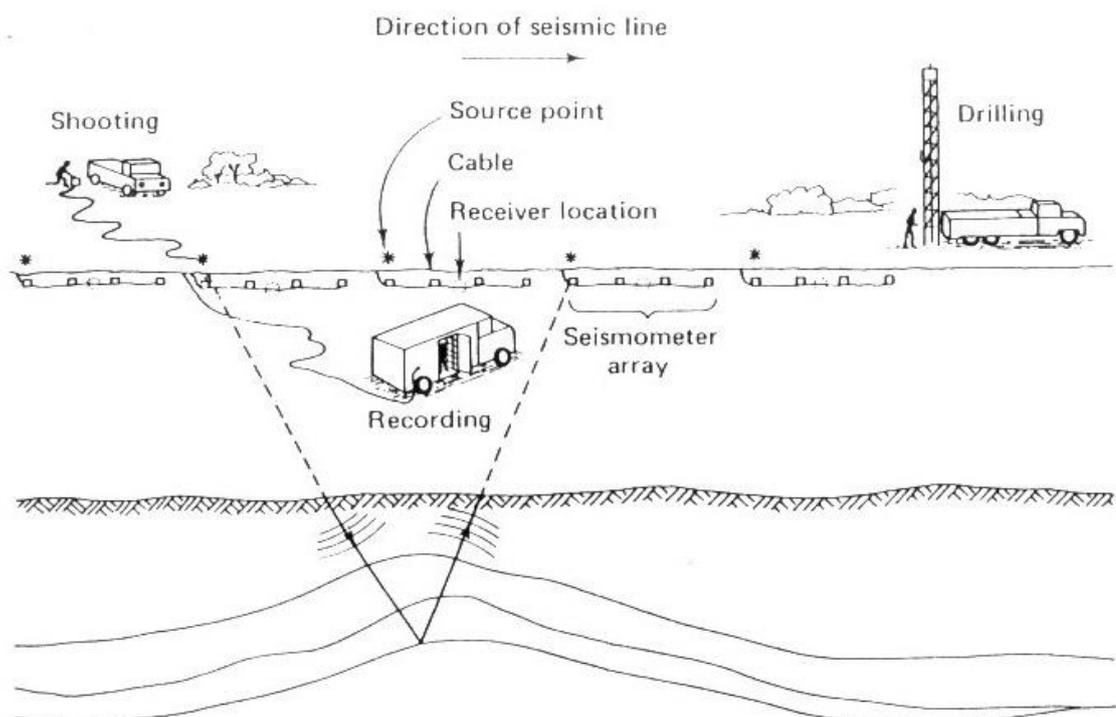


Figura 1: esquema general del método sísmico de reflexión. (Reproducido de Tejada, 2013).

Todos los datos obtenidos y almacenados son suministrados al procesador quien al final crea una sección sísmica (2D) o un volumen de datos (3D) para que el intérprete analice los resultados y determine si es viable la perforación de pozos de producción.

De acuerdo a lo expuesto anteriormente podemos distinguir tres fases en el método sísmico de reflexión: Adquisición, Procesamiento e Interpretación de datos. A continuación se describen las generalidades de estas etapas.

## **Adquisición sísmica**

Los siguientes párrafos son una reseña de la adquisición sísmica basada en los trabajos de Tejada (2013) y Martínez Corredor (2011).

La adquisición sísmica consiste en recuperar la mayor cantidad de señal sísmica a partir de un punto energizado. Para ello se debe contar con una serie de instrumentos que permitan llevar a cabo esto:

- **Fuente de energía:** generadora de ondas sísmicas. La fuente de energía tiene que ser de una potencia tal que permita la propagación de aquellas a través del subsuelo. También debe cumplir con la condición de proporcionar energía en un lugar espacial específico (lo más puntual posible) al mismo instante. Esta condición asegura una superficie esférica del frente de onda generado (siempre que el subsuelo sea homogéneo).

- **Receptores:** los cuales reciben la “señal sísmica”. Son transductores de energía mecánica (impulso de llegada) a diferencias de potencial eléctrico. Detectan los cambios en el tiempo de las señales (señal analógica) que se preamplifican y se conducen al sistema digital de grabado de datos.

- **Sistemas digitales de grabado de los datos:** se encargan de digitalizar las señales analógicas recibidas y reunir las en la forma delineada por el operador (diseño de adquisición sísmica) para el procesamiento.

El diseño de adquisición sísmica en campo puede tener diferentes formas espaciales pero el objetivo sigue siendo el de obtener la mayor cantidad de datos a partir de un punto “iluminado”.

La adquisición sísmica puede efectuarse en un solo plano (sísmica 2D) o en forma espacial (sísmica 3D). La cantidad de instrumental utilizado en esta última es mucho mayor que la requerida para la adquisición de 2D.

Las ventajas que aporta un diseño sísmico 3D respecto a líneas sísmicas 2D son las de brindar una mayor densidad areal y una mejor continuidad lateral de datos, lo cual permite establecer una mejor ubicación de las estructuras geológicas del subsuelo. Debido a la cantidad de datos recolectados, se mejora en gran medida la relación señal ruido.

En general, la planificación de una adquisición sísmica 3D implica realizar diseños específicos en superficie a fin de obtener suficiente información en profundidad para poder caracterizar los objetivos geológicos de interés. Es por esta razón que pueden diseñarse diferentes “caminos” para adquirir datos sísmicos 3D en el campo (Fig. 2).

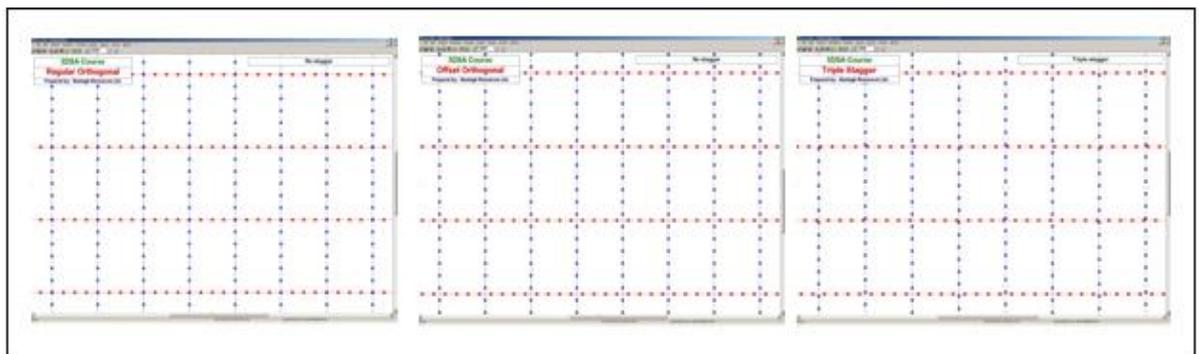


Figura 2: Diseños ortogonales utilizados en el levantamiento de datos 3D. Los puntos rojos corresponden a las fuentes y los azules a los receptores (Tomado de Herrera *et al.*, 2010).

Los registros sísmicos obtenidos a partir de las reflexiones generadas en profundidad se caracterizan por tener formas hiperbólicas debido a la ecuación de propagación que gobierna el recorrido de las ondas (Fig. 3).

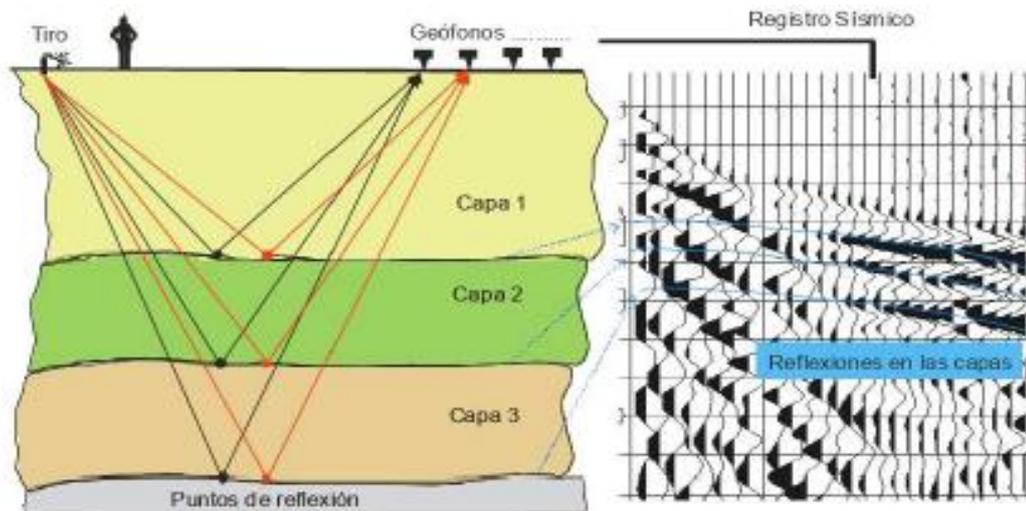


Figura 3: Recorrido de los rayos sísmicos reflejados y su registro sísmico asociado (Tomado de Florez y Antonieta, 2004; en Martínez Corredor, 2011).

## Procesamiento sísmico

A continuación se hace un resumen de las etapas del procesamiento sísmico en base a Martínez Corredor (2011).

Luego de obtener en los registros de campo las reflexiones registradas por los diferentes geófonos se procede a la etapa de pre-procesamiento, la cual abarca:

- **Asignación de geometría:** la manera según la cual estaban distribuidos los puntos de tiro y los receptores durante el levantamiento de datos es incorporada a los datos sísmicos.
- **Edición de trazas:** las trazas ruidosas, las trazas con picos (spikes) aleatorios, o las señales monofrecuencia deben ser suprimidas; las trazas con polaridad invertida deben ser corregidas.
- **Recuperación de amplitudes:** una función de ganancia es aplicada a los datos para corregir los efectos de la divergencia esférica en la energía del frente de onda.
- **Filtros en frecuencia:** estos filtros son los más importantes en el procesamiento de señales. La energía de las reflexiones está presente en un cierto intervalo de frecuencias. Los ruidos específicos de la fuente, como así también otros tipos de ruidos se encuentran comúnmente en otros rangos de frecuencias, haciendo posible la separación de ellos de la información de la reflexión.

- **Deconvolución:** típicamente la deconvolución tiene como objetivo mejorar la resolución temporal, comprimiendo en lo posible el pulso efectivo de la fuente contenido en la traza sísmica a un Pulso de Dirac o Función Delta.
- **Correcciones estáticas:** estas correcciones se aplican para corregir los sobretiempos debido a la elevación de los receptores (correcciones estáticas por elevación) llevándolos a un plano de referencia o *datum* sísmico; como así también para corregir los efectos producidos por la capa meteorizada de baja velocidad (*weathering*).
- **Ordenamiento CDP:** consiste en ordenar y agrupar las trazas que poseen un punto común en profundidad (*common depth point*, CDP) ubicado por debajo del punto medio entre la fuente y el receptor (*common mid point*, CMP) (Fig. 4).

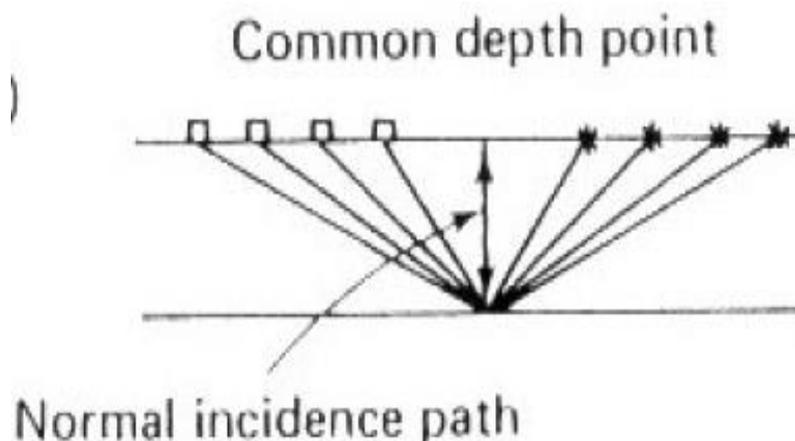


Figura 4: Esquema del *common depth point* para diversas posiciones entre la fuente y el receptor (Modificado de Tejada, 2013).

Después de tener los datos con las correcciones se procede a realizar el análisis de velocidades. El objetivo de dicho análisis es encontrar la velocidad que mejor horizontalice la hipérbola de la reflexión y, como consecuencia, obtener el mejor resultado cuando el apilamiento es aplicado.

Luego de tener el campo de velocidades RMS suavizado se procede con la etapa de apilado. Esta etapa consta de dos pasos que se definen a continuación:

- **Corrección NMO:** el campo de velocidades es usado en la corrección del sobretiempos normal (*normal moveout correction*) en las familias de trazas CDP. Después de efectuar la corrección NMO, los eventos son virtualmente

horizontalizados a lo largo del eje de los offsets. En otras palabras, el efecto de la distancia fuente-receptor es eliminado del tiempo de propagación

- **Apilado:** el apilamiento es realizado por la suma horizontal de los datos corregidos de NMO, de una familia CDP. Idealmente el resultado es una aproximación de la sección *zero-offset* donde las reflexiones son supuestas verticalmente por debajo del CMP.

Finalmente, luego de la etapa de apilado viene la migración (aunque la misma puede realizarse también antes, es decir una migración pre-apilado).

El proceso de migración se utiliza para mover los reflectores desde una ubicación dada a su ubicación e inclinación reales. Se basa en las diferentes soluciones de la ecuación de onda elástica a través del medio, tomando en cuenta el análisis de velocidades para redistribuir la energía de los reflectores desde el punto medio hasta su posición verdadera.

Existen diferentes métodos o algoritmos de migración, y cada uno de ellos puede traer consigo soluciones diferentes, dependiendo del modelo de velocidades y de la calidad de los datos a procesar.

## Interpretación sísmica

Una vez concluido el procesado de datos obtenemos como producto final una sección sísmica (sísmica 2D) o bien un cubo sísmico (sísmica 3D). En este último caso la información de carácter tridimensional provee una cobertura areal para cada reflector iluminado en profundidad (Kearey *et al.*, 2002) otorgando grandes ventajas por encima de la sísmica 2D.

Una de estas ventajas es la visualización de los datos (Fig 5). A partir de un cubo sísmico podemos desplegar líneas sísmicas 2D no solo a lo largo de la dirección de los receptores (*Inlines*) o de las fuentes (*Crosslines*) sino también a lo largo de cualquier dirección arbitraria (Kearey *et al.*, 2002).

También el volumen sísmico permite visualizar secciones horizontales denominadas *time slices* a un tiempo determinado, donde se muestran las amplitudes de todos los eventos sísmicos presentes a ese valor de tiempo elegido (Tejada, 2013).

Esta versatilidad de visualización que brinda un cubo sísmico, permite obtener además de mapas estructurales en tiempo del reflector de interés, mapas de amplitudes. Estos mapas de amplitudes muestran la variación de amplitud sobre la

superficie interpretada. Estas variaciones pueden aportar datos importantes referidos a parámetros geológicos y/o físicos del reflector interpretado (Tejada, 2013).

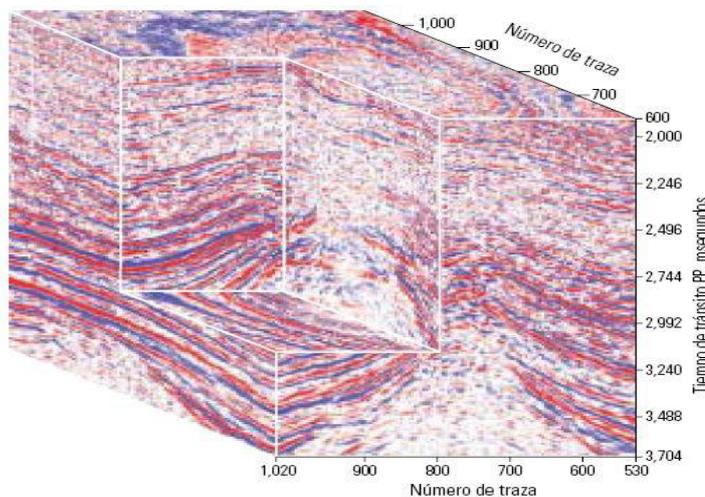


Figura 5: Visualización de la sísmica 3D mediante un cubo sísmico (Tomado de Tejada, 2013).

A partir de ahora se completa la descripción del proceso de interpretación en base a Tejada (2013).

Interpretar una sección sísmica significa realizar un seguimiento coherente de la continuidad de las trazas y de aquellos datos anómalos que la perturben (falta de continuidad, valores anómalos, etc.) para tratar de conformar un modelo geológico del subsuelo.

El objetivo principal de un trabajo de interpretación sísmica es el de generar un modelo geológico estructural y estratigráfico que permita brindar una descripción detallada del área.

En la prospección y desarrollo de hidrocarburos, los datos sísmicos se utilizan para definir la posición estructural, morfología y distribución espacial de los reservorios, de la roca madre y de sus vías de migración, junto con los datos que brindan los pozos del área.

La metodología de la interpretación sísmica es, una vez identificados los posibles reflectores de interés geológico, delimitarlos o “picarlos” en todas las secciones en donde puede determinarse su continuidad. Los rasgos que frenen la continuidad del mismo, son también importantes indicarlos como fallas (en el caso que se sospeche que pertenezcan a este rasgo geológico), acuñaamiento o pérdida de espesor del mismo. Es importante tener en cuenta que todos estos rasgos deben ser coherentes con rasgos geológicos existentes.

En las cuencas sedimentarias los reflectores tienden a seguir líneas de tiempo geológico, es decir, superficies de sedimentación contemporánea y no líneas-roca.

Si lateralmente cambia el tipo de roca, debido a cambios en las condiciones del ambiente sedimentario dentro de un mismo tiempo geológico determinado, cambiarán entonces lateralmente las impedancias acústicas y, por lo tanto, la amplitud y, en general, el aspecto o carácter de la reflexión: su amplitud, quizás su frecuencia, y eventualmente el modo en que se interfiere con otras reflexiones supra o infrayacentes.

Una superficie sísmica de reflexión (horizonte, nivel guía, reflector) en su expresión geológica actual muestra, normalmente el resultado de unos rasgos de sedimentación originales alterados estructuralmente por la tectónica posterior. No siempre los reflectores responden a líneas-tiempo, tal es el caso de los contactos con intrusiones ígneas o diapíricas, los planos de falla subhorizontales y otros.

### **2.3 Zona de estudio: generalidades y ubicación**

El área de estudio corresponde al bloque de exploración Bandurria. El mismo se encuentra ubicado en la parte central de la Cuenca Neuquina (Fig.6), dentro del sector denominado "Engolfamiento Neuquino".

Geográficamente el área, de unos 460 km<sup>2</sup>, se encuentra dentro del departamento Añelo de la provincia de Neuquén y dista unos 120 km en dirección N-NO de la capital provincial (Figs. 6 y 7). En coordenadas Gauss-Kruger (Datum: Campo *Inchauspe*), el cubo sísmico 3D tiene como esquinero noroeste las coordenadas X: 2.488.900, Y: 5792000 y como esquinero sureste las coordenadas X: 2558000, Y: 5752400.



Figura 6: Ubicación del bloque Bandurria (en rojo) dentro de la Cuenca Neuquina (en amarillo). Imagen tomada de Google Earth.

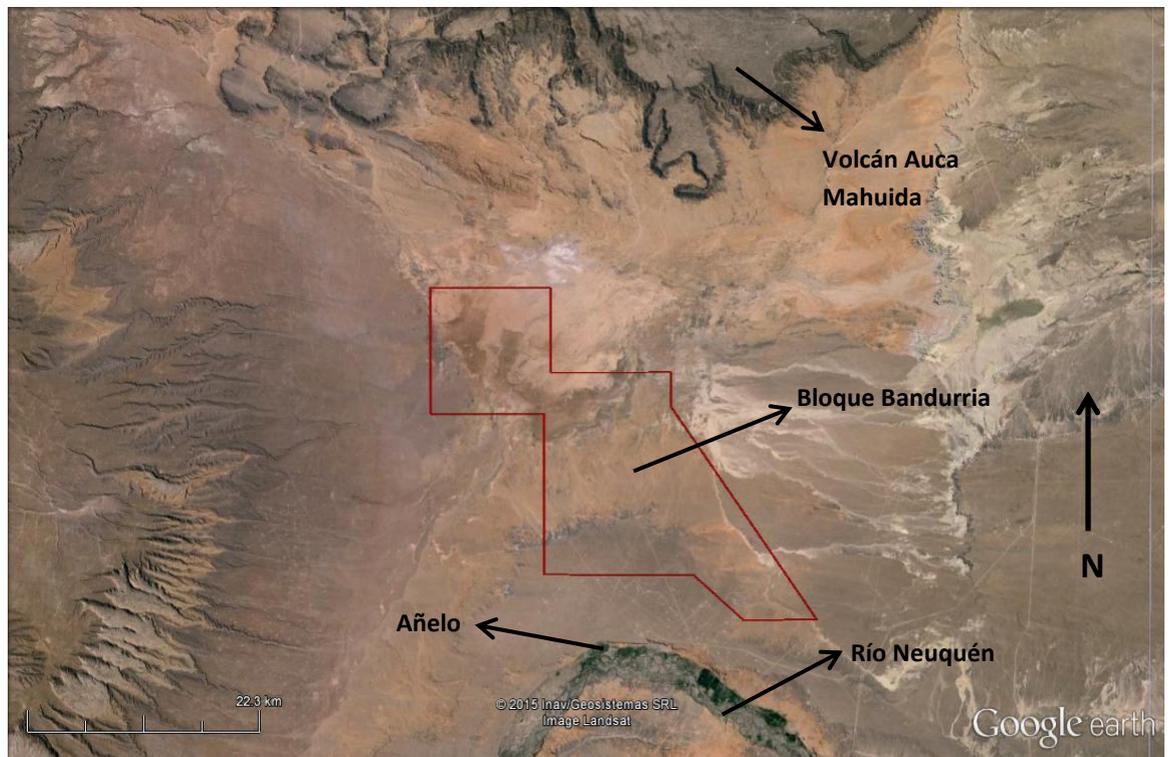


Figura 7: Bloque Bandurria y alrededores. Imagen tomada de Google Earth.

### 3 GEOLOGIA REGIONAL Y DEL AREA DE ESTUDIO

#### 3.1 Cuenca Neuquina

La Cuenca Neuquina forma parte de una extensa comarca petrolera que abarca casi la totalidad de la provincia de Neuquén, el sector occidental de las provincias de Río Negro, La Pampa y la porción suroccidental de la provincia de Mendoza (Mendiberri y Carbone, 2002) (Fig. 8). Se extiende desde los 34° y hasta los 41° de latitud sur comprendiendo una superficie de 115.000 km<sup>2</sup> (Barredo y Stinco, 2010). Los límites noreste y sureste son de naturaleza cratónica y están constituidos respectivamente por el Sistema de la Sierra Pintada y el Macizo Nordpatagónico; mientras que el límite oeste lo constituye la Cordillera de Los Andes (Tankard *et al.*, 1995).

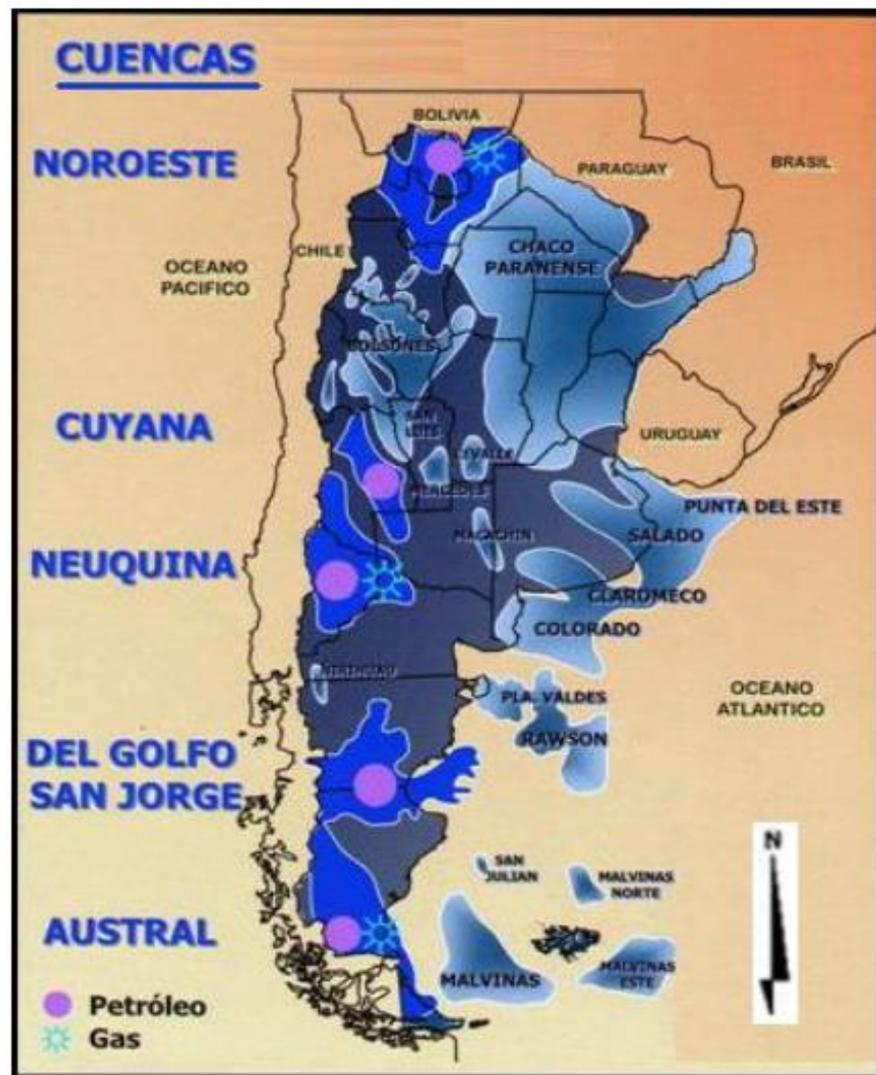


Figura 8: Principales cuencas productivas de Argentina (modificada de V Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, IAPG Octubre 2002).

La Cuenca Neuquina constituye, en relación con la producción de Hidrocarburos, una de las cuencas más importantes del país. Contribuye a esta calificación su considerable producción y cantidad de reservas de petróleo y gas, que la ubican en un lugar de privilegio dentro del contexto nacional. Además se suma su diversidad geológica ya que es posible hallar rocas que representan casi todos los ambientes sedimentarios, magníficamente expuestos en los afloramientos del sector occidental, como así también una amplia gama de rocas ígneas. En todos los tipos litológicos mencionados se registran múltiples y diferentes casos de entrapamientos comerciales (Fig. 9), que abarcan casi por completo la columna estratigráfica, desde granitos basamentales hasta niveles someros del Terciario (Mendiberri y Carbone, 2002).

Su relleno alcanza espesores de hasta 7000 metros (Vergani *et al.*, 1995) y comprende una alternancia de sedimentos continentales y marinos que comenzaron a depositarse durante una etapa de rift en el Triásico Temprano. Luego, durante el Jurásico Temprano al Cretácico Temprano, continuó la acumulación en una cuenca de retroarco. Finalmente, a partir del Cretácico Tardío y particularmente durante el Neógeno, con el avance de la faja plegada y corrida desarrollada sobre el margen oeste de la cuenca, los depósitos se acumularon en una cuenca de antepaís, migrando episódicamente hacia el E-NE (Boll *et al.*, 2014).

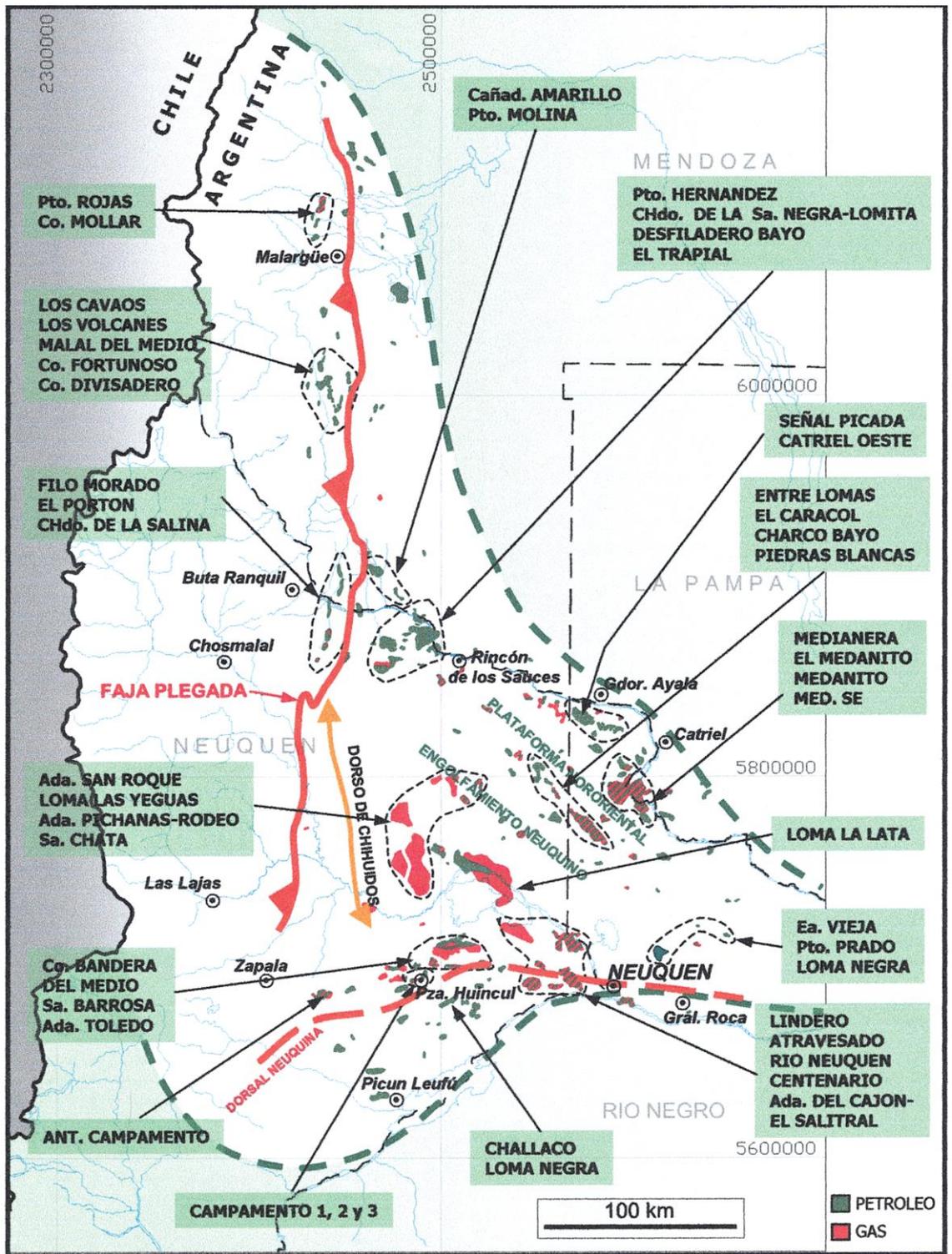


Figura 9: Principales yacimientos hidrocarbúricos de la Cuenca Neuquina. Se muestran también algunas estructuras geológicas de carácter regional (Tomado de Mendiberri y Carbone, 2002).

### **3.1.1 Historia geológica**

A continuación se realiza una breve reseña de la historia geológica de la cuenca Neuquina en base a Mendiberri y Carbone (2002).

#### **3.1.1.1 Estratigrafía**

La estructuración de la cuenca comenzó durante tiempos triásicos, desarrollándose una serie de fosas marginales de relleno diverso, labradas sobre un extenso plateau dominado por las rocas del Gr. Choiyoi. Estos depósitos de carácter continental, que alcanzan hasta el Jurásico Inferior, pertenecen al denominado Grupo Precuyano y fueron gobernados por regímenes de subsidencia por falla.

Al Precuyano le suprayacen sedimentos correspondientes a la etapa final de synrift, seguida por un periodo de hundimiento termal (Gr. Cuyo), representados por una ingresión marina (Fm. Los Molles) acaecida a principios del Jurásico, seguida por un conjunto de progradaciones clásticas (Fm. Lajas) y culmina con sedimentos rojos aluviales (Fm. Challacó), los que son cubiertos por las facies evaporíticas de la Fm. Tábanos. Este intervalo "Jurásico" se completa con las areniscas y calizas arrecifales lotenianas del Jurásico Medio (Fms Lotena y La Manga), producto de un nuevo avance del mar, el que remata con una espesa secuencia de evaporitas de centro de cuenca (Fm. Auquilco).

Dicho proceso es interrumpido por un importante evento diastrófico, a través del cual se produce una reactivación del arco volcánico en el oeste, junto con los relieves en el eje de la "Dorsal Neuquina". Como consecuencia se deposita un espeso intervalo de clásticos continentales aluviales, fluviales y eólicos (Fm. Tordillo-Jurásico Superior). Este paisaje es inundado en tiempos Tithonianos (Fm. Vaca Muerta), sobre el que se desarrollan las progradaciones clástico-calcáreas proximales de la Fm. Quintuco, conformando este par el Gr. Mendoza Inferior (Tithoniano-Valangiano Inferior).

A partir de una importante caída del nivel mar, se depositan importantes depósitos clásticos (Fm. Mulichinco) que posteriormente son cubiertos por otra ingresión marina (Fm. Agrio), equivalente temporal de las areniscas y conglomerados rojizo-blanquecinos de la Fm. Centenario, que constituyen una importante progradación clástica proveniente del sudeste de la cuenca. Este intervalo abarca el Gr. Mendoza Superior (Valanginiano-Barremiano).

Al Gr. Mendoza le suprayace el Gr. Rayoso (Aptiano-Albiano) que representa un evento de desecación importante, con la depositación de facies clásticas y evaporíticas (Fms. Huitrín y Rayoso).

Sobre el Gr. Rayoso apoyan discordantemente las sedimentitas del Gr. Neuquén, compuestas por arcilitas y areniscas rojo-violáceas continentales del Cretácico Superior.

A principios del Terciario se produce la transgresión atlántica, depositando arcilitas verdosas y amarillentas junto a los calcáreos blanquecinos y evaporitas que se asignan complejamente al Gr. Malargüe.

Completan la columna en el sector mendocino, los registros pertenecientes a depósitos terciarios con gran participación volcánica íntimamente relacionados con las fases diastróficas andinas.

Cabe mencionar que la gran mayoría de los intrusivos que afecta a casi toda la columna sedimentaria de la cuenca son de edad terciaria (mayormente posteriores al Eoceno) y también relacionados con el distrofismo Andino.

En la Figura 10 se presenta una columna estratigráfica general de la cuenca.

### **3.1.1.2 Geología Estructural**

El relleno inicial de la cuenca fue desarrollado sobre un escenario de apertura (rifting), con depocentros bien localizados, aislados y desconectados, paralelos a los bordes de la misma.

Un primer estadio de estabilización regional, permitió la transgresión del mar cuyano, en tiempos del Jurásico Inferior. Este período de relleno es interrumpido a finales del ciclo Cuyano, por un evento de inversión tectónica, localizado en el ámbito de la "Dorsal Neuquina".

En tiempos Intermálmicos ocurre un fenómeno transpresivo de magnitud (Discordancia Intramálmica), que fue reactivado en el Cretácico superior (Discordancia Intersenoniana), localizado a lo largo de la "Falla de Huincul". Producto de estos eventos, sobre esta morfoestructura, se registran numerosas discordancias angulares.

Ya en el Terciario la inversión de la pendiente, permitió la ingesión del mar Atlántico.

La tectónica andina, no comenzó a manifestarse sino hasta el Oligoceno Inferior en la faja plegada y fallada, la que se encuentra aún activa. Los niveles de despegue responsables de los corrimientos terciarios principales, corresponden a las margas de la Fm. Vaca Muerta. Estos permitieron el desarrollo de importantes estructuras. Los estilos de deformación con basamento involucrado pueden resumirse en: fallamiento extensional antiguo, inversión tectónica y fallamiento de rumbo en la dorsal, mientras que las estructuras de despegue, corresponden tanto a la faja plegada y fallada, como a la plataforma no deformada.

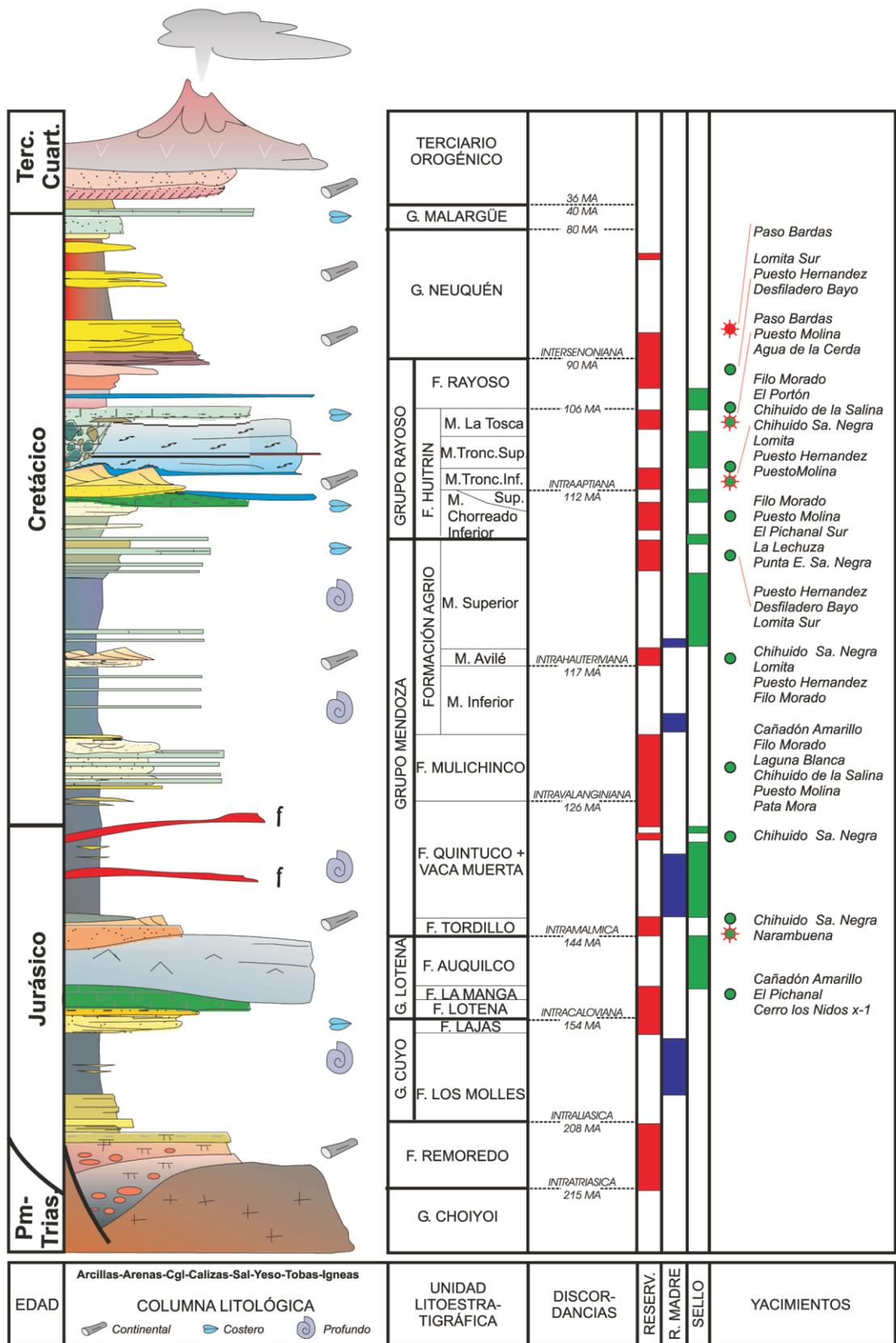


Figura 10: Cuenca Neuquina. Columna estratigráfica sintética. Región Rincón de Los Sauces (Reproducido de Mendiberri y Carbone, 2002).

## **3.2 Geología local**

### **3.2.1 Marco estratigráfico**

En el área de estudio se encuentran presentes en subsuelo las siguientes unidades litoestratigráficas (ver Fig. 11): Grupo Choiyoi y Precuyano, Grupo Cuyo (Fms. Los Molles y Lajas), Grupo Lotena (Fms. Lotena, Barda Negra y Auquilco), Grupo Mendoza (Fms. Tordillo, Vaca Muerta, Quintuco, Mulichinco y Centenario), Grupo Rayoso, Grupo Neuquén y por último, en los niveles más someros, depósitos del Terciario.

Además de las unidades sedimentarias mencionadas en el párrafo anterior, también se hallan presentes intrusiones magmáticas de composición básica y edad terciaria (Comeron *et al.*, 2002) que intruyen las rocas del Intervalo Qco-Vaca Muerta.

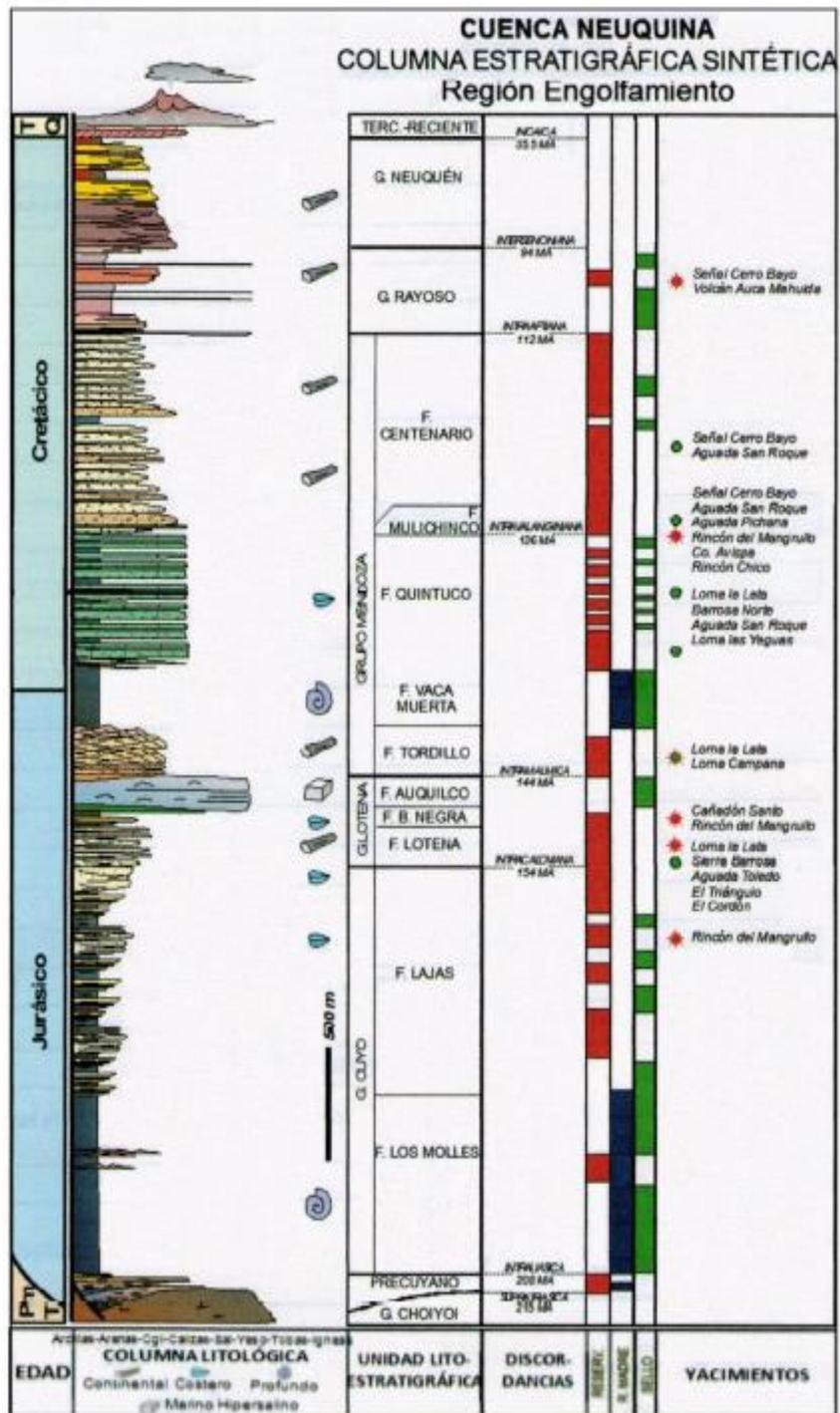


Figura 11: Columna estratigráfica en el sector del Engolfamiento Neuquino (tomada de Veiga, 2001; en Araniti, 2012).

Desde el punto de vista geofísico, en este trabajo se han analizado las Formaciones Vaca Muerta y Quintuco (Intervalo Quintuco-Vaca Muerta); como así también un cuerpo intrusivo de edad Terciaria (Filón Loma de Las Yeguas). Por lo tanto a continuación se hace una descripción de dichas unidades geológicas.

### 3.2.1.1 Intervalo Quintuco-Vaca Muerta

Los siguientes párrafos son un extracto de Olmos *et al.* (2002) y Leanza *et al.* (2011).

El ciclo Quintuco-Vaca Muerta conforma un evento transgresivo-regresivo que cubre toda la cuenca conformando un sistema petrolero, y representa un contexto depositacional de cuenca marina con fondo euxínico, circundada por un cinturón nerítico sometido a sedimentación carbonática y terrígena.

La Fm. Vaca Muerta, compuesta por lutitas grises y negras, calizas micríticas y margas bituminosas, representa la transgresión isócrona (Tithoniano inf) de cientos de kilómetros. Las sedimentitas de la Fm. Quintuco describen, a rasgos generales, la progradación del ciclo, ampliando el área de sedimentación, y están constituidas por un cortejo de facies que desde el borde sudeste al centro de cuenca pueden resumirse en: dolomitas y anhidritas con intercalaciones areno-conglomerádicas, *grainstones* oolíticos y bioclásticos, margas limosas intercaladas con calizas micríticas y arcillas limosas calcáreas.

El intervalo Qco-Vaca Muerta describe un completo conjunto de clinofomas progradantes, a partir de una importante transgresión basal, recibiendo aportes de sedimentos desde el Este-Sudeste para evolucionar hacia los términos superiores a secuencias de plataformas extensas cuyo paralelismo puede seguirse tanto en superficie como en subsuelo mediante perfiles e información sísmica.

La relación de base está dada por un contacto neto entre los depósitos continentales de la Fm. Tordillo y la súbita aparición de la asociación de lutitas negras de ambiente marino con arreglo retrogradante, que constituyen la sección basal del Intervalo. Este fenómeno, según Mutti *et al.* (1994), constituye una inundación catastrófica, caracterizado por una superficie de ravinamiento en la base de la unidad y una intensa deformación sinsedimentaria de muchas de las capas cuspidales de la Fm. Tordillo.

El techo del intervalo estratigráfico está dado por la discordancia Intravalanginiana. Esta discordancia, en el sector del Engolfamiento, pone en contacto brusco las sedimentitas de Quintuco con areniscas fluviales de la Fm. Mulichinco.

### **3.2.1.2 Intrusivo Loma de Las Yeguas**

Este cuerpo es una intrusión hipoabisal de tipo filoneana que yace dentro del Intervalo Qco-Vaca Muerta (Comeron *et al.*, 2002).

El filón de composición básica (olivino gábrico) y de una edad de 1,44 a 1,55 Ma. (González *et al.*, 2005) presenta internamente facies, las cuales habrían resultado de la diferenciación magmática durante su enfriamiento (Comeron *et al.*, 2002) Dichas facies están definidas petrográficamente y se las describe como: facies "Gc" microgabro de textura afanítica ubicada en el borde del cuerpo, facies microgabro "Gp" de textura granular y facies "Ga" microgabro de textura granular muy fina, con evidencias de gran alteración.

El probable centro emisor de este cuerpo ígneo es el Volcán Auca Mahuida, que se encuentra unos 30 km al norte del mismo (Comeron *et al.*, 2002).

### **3.2.2 Marco estructural**

Desde el punto de vista estructural, el bloque Bandurria se encuentra ubicado sobre una estructura geológica de carácter regional: el Bajo de Añelo. Este elemento estructural está caracterizado en superficie por un bajo topográfico cubierto por barreales salitrosos; mientras que en profundidad coincide con un extenso sinclinal cuyo eje axial presenta una dirección NO-SE (González *et al.*, 2005).

A continuación se completa la descripción del Bajo de Añelo mediante un extracto de Pángaro *et al.* (2011).

El Bajo de Añelo se extiende a lo largo de unos 280 km desde General Roca hasta el área al noroeste del Volcán Auca Mahuida (Fig.12), y es claramente visible en mapas estructurales como un amplio sinclinal con 750 m de relieve estructural. De SE a NO está dividido en tres segmentos (oriental, central y occidental) caracterizados por una diferente morfología, mecanismos de subsidencia y evolución estructural.

El área estudiada se ubica en el segmento central. Dicho segmento muestra una subsidencia termal inicial cuyo eje coincide geográficamente con el Bajo de Añelo para luego, desde el Jurásico Tardío dar paso a una subsidencia regional con basculamiento hacia el oeste. La estructuración de la Dorsal de Huincul modifica

entre el Jurásico Tardío y el Cretácico Tardío la pendiente estructural regional dando forma al Bajo de Añelo en esta porción.



Figura 12: Imagen satelital de la cuenca Neuquina donde se muestra el Bajo de Añelo y sus 3 segmentos. A) Segmento oriental. B) Segmento central (aquí se encuentra el área de estudio). C) Segmento occidental. Se muestran también otras estructuras cercanas: 1. Dorso de Chihuidos. 2. Alto de Kauffman. 3. Dorsal de Huincul. 4. Alto de Sauzal Bonito. 5. Volcán Auca Mahuida. 6. Aguada San Roque. (Reproducida de Pángaro *et al.*, 2011).

### 3.2.3 Sistema petrolero

A continuación se efectúa una reseña en base a González *et al.* (2005).

El desarrollo de rocas generadoras y reservorios dentro del contexto morfoestructural del Bajo de Añelo es bueno, mientras que su principal falencia son las trampas estructurales. Debido a esto último, la exploración de hidrocarburos fue limitada, en su inicio, a trampas estratigráficas y a muy pequeños cierres estructurales.

El descubrimiento en 1985 de interesantes producciones y acumuladas de gas y petróleo, provenientes de cuerpos intrusivos, abrió un nuevo horizonte para la exploración de hidrocarburos en este contexto.

Los dos yacimientos más importantes de este tipo, dadas las altas producciones y acumuladas obtenidas de ellos, son el Yacimiento Loma de Las Yeguas (LLY) y el de Aguada San Roque (Fig. 13).

En el presente trabajo se describirá el yacimiento LLY, ya que el cubo sísmico estudiado cubre el extremo sur del citado yacimiento. Además el análisis sísmico del intrusivo productivo en LLY es abordado en detalle en esta tesina. Dicha descripción y análisis se hacen en el capítulo 6.

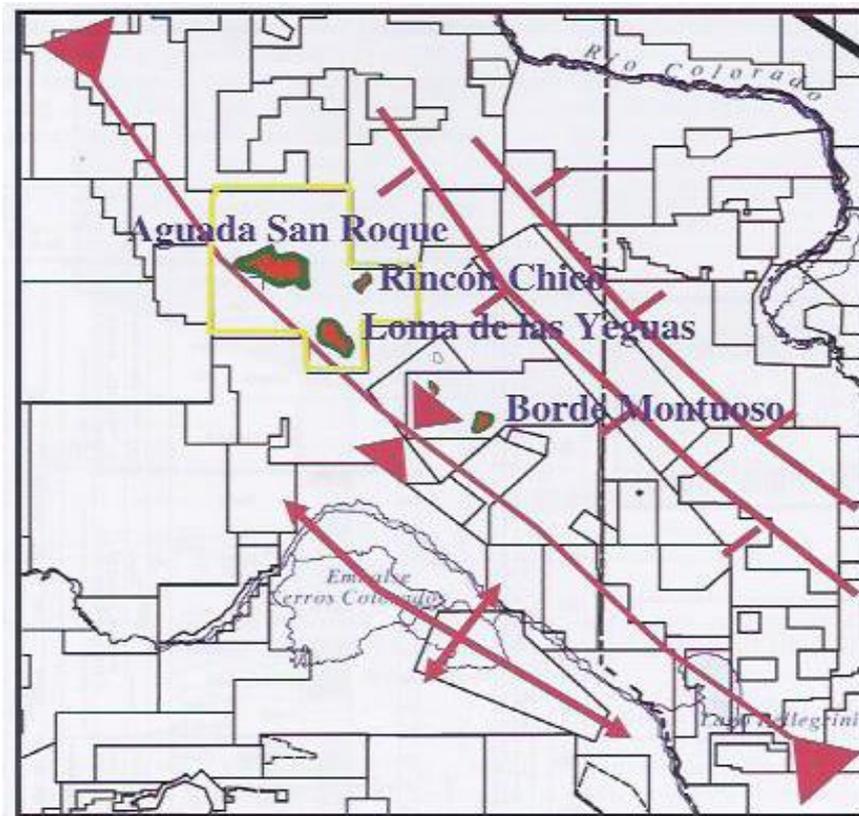


Figura 13: Mapa de ubicación de los principales yacimientos en el área del Bajo de Añelo. Dentro del sector amarillo aparecen los yacimientos Loma de Las Yeguas y Aguada San Roque. (Reproducido de González *et al.*, 2005).

## **4 METODOLOGÍA DE TRABAJO**

### **4.1 Introducción y Geofísica del área**

Para poder realizar el presente trabajo se contó con información sísmica 3D proveniente del bloque Bandurria y alrededores, cubriendo una extensión areal de unos 1467 km<sup>2</sup>. La cobertura superficial de la sísmica es mucho mayor que el área de concesión Bandurria (460 km<sup>2</sup>, Fig. 7). Esto se ve claramente en la Figura 17.

También se dispuso de información de 3 pozos perforados por YPF. Esta información abarca datos técnicos de los pozos (ubicación, cota, profundidades, etc.) como así también registros eléctricos de distinto tipo y pases formacionales.

Tanto los datos de la sísmica como los de los pozos fueron provistos por la Subsecretaría de Minería e Hidrocarburos de la Provincia de Neuquén, bajo acuerdo de confidencialidad con el Gabinete de Geociencias Aplicadas a la Exploración y Producción de Hidrocarburos (GGAEPH), éste último dependiente de los departamentos de Geología y Geofísica y Astronomía de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la UNSJ.

La parte práctica del presente Trabajo Final se realizó en las oficinas del GGAEPH bajo la asesoría del Lic. en Geología Martín Cevallos y la co-asesoría de la Lic. en Geofísica Silvia Tejada.

### **4.2 Software**

Para poder cumplir con los objetivos propuestos en este trabajo se utilizó la plataforma IHS Kingdom, versión 8.7.1 – 32 bit, software de administración e interpretación de datos de subsuelo aplicados a la industria del petróleo. El citado software se enfoca en las interpretaciones de geología y geofísica, como son la interpretación sísmica, el análisis petrofísico, las correlaciones de perfiles de pozo y el mapeo del subsuelo.

Kingdom es un software de amplio uso en las geociencias. Es muy utilizado por muchas compañías de exploración y producción con la finalidad de explorar y desarrollar yacimientos de hidrocarburos en el subsuelo.

Se caracteriza por ser muy intuitivo, lo cual favorece su uso (especialmente cuando se está iniciando en el manejo de este tipo de software, tal es el caso de los estudiantes del GGAEPH).

El software provee un espacio de trabajo integrado para construir interpretaciones, identificar zonas de interés y para optimizar las zonas donde se ubicarán los futuros pozos.

### **4.3 Creación del proyecto de trabajo y carga de datos sísmicos**

El primer paso fue crear un proyecto de trabajo dentro del software. Un proyecto incluye toda la información que nos va a permitir caracterizar un área hidrocarburífera (ya sea en su etapa de exploración o de explotación). Es decir información sobre pozos, sísmica, imágenes satelitales del lugar, etc. El mismo se guardó en la PC utilizada bajo el nombre “bandurria”.

Durante la creación del proyecto se definen algunos aspectos importantes, tal como el sistema de unidades con el que se va a trabajar. En este caso se trabajó con el sistema métrico.

Una vez creado el proyecto se logró visualizarlo en la ventana de inicio del software, en conjunto con los proyectos creados por otros usuarios. Esto aparece en la ventana *Recent Projects* (Fig. 14).



Figura 14: Ventana de inicio del software con los proyectos creados (rodeados por un cuadro rojo).

Luego de creado el proyecto se procedió a cargar la sísmica 3D bajo el formato SEG-Y. Los archivos SEG-Y son archivos binarios que están codificados por la SEG (*Society of Exploration Geophysicists*).

Para cargar la sísmica se seleccionó la opción *Survey* → *Import SEG Y* en la ventana principal del software (Fig. 15).

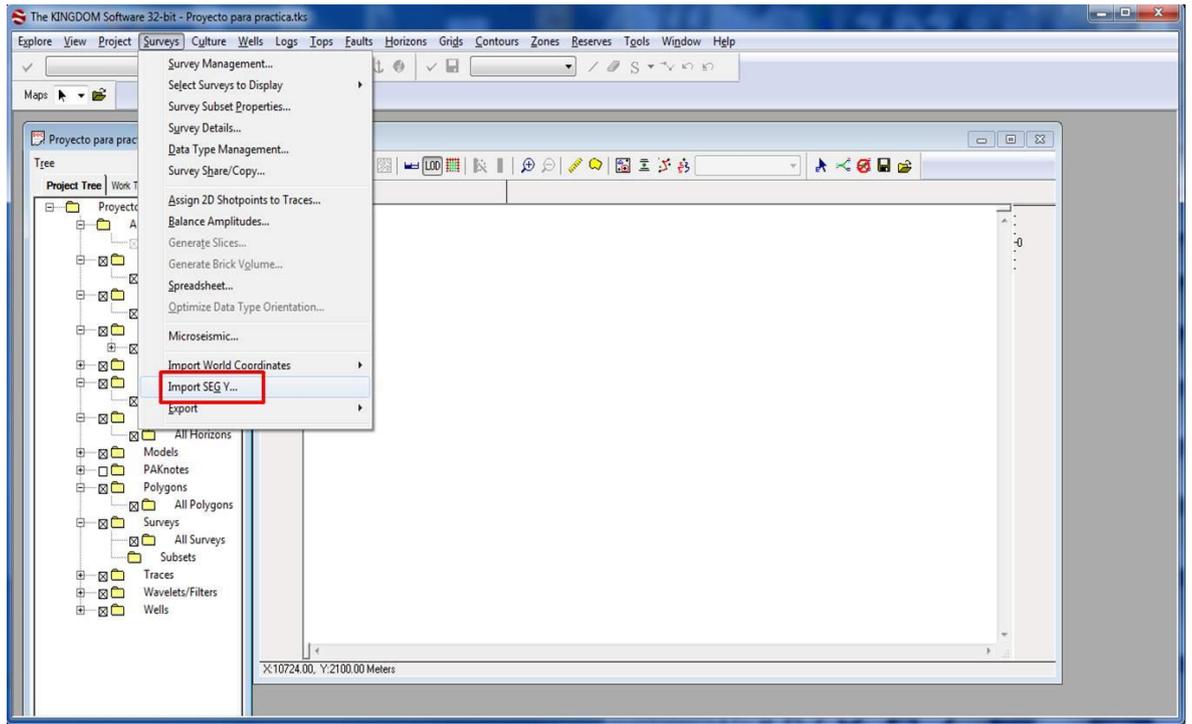


Figura 15: Paso inicial para cargar la sísmica

A continuación se fue completando información adicional tal como los bordes del cubo sísmico (en coordenadas *Gauss Kruger-Campo Inchauspe*), el dominio de los datos con los que se trabajó (dominio del tiempo), el atributo sísmico con el que se manipularon los datos (amplitud), etc.

Finalmente, una vez concluida la carga se pudo visualizar el *Base Map*, y a partir del mismo desplegar cualquier línea sísmica (Fig. 16).

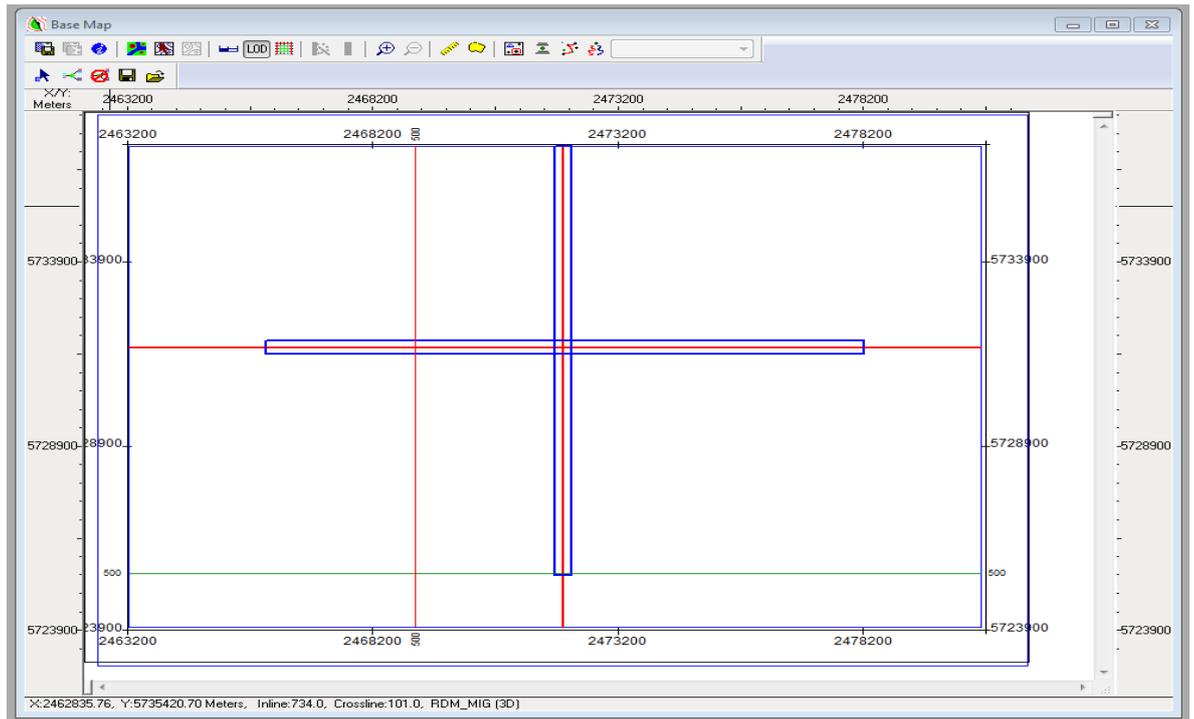


Fig. 16: Visualización del *Base Map* a partir del cual se pueden desplegar cualquier tipo de líneas sísmicas.

#### 4.4 Carga de datos de pozo

A continuación se cargaron los datos de los pozos y los perfiles eléctricos de los mismos. Toda esta información viene contenida en un archivo LAS (*Log Ascii Standard*). Este formato es un archivo ASCII especialmente estandarizado para datos de perfiles de pozo. Contiene una sección de cabezal (*Header*) donde se describen datos del pozo como coordenadas, nivel del terreno, profundidad final, cantidad y tipo de curvas, etc., y luego siguen los datos de las curvas tabulados y referidos a una profundidad.

Se contó con los datos provenientes de 3 pozos, correspondientes a los campos de Cerro Morado (CoMo.x-1), Añelo Neuquén (AnN.x-1) y Bajada Colorada (BaCa.x-1). En la Figura 17 se observa la ubicación de los pozos en el contexto del área estudiada. Como podemos ver, el primero de ellos (CoMo.x-1) se encuentra en un sector que no es cubierto por la sísmica.

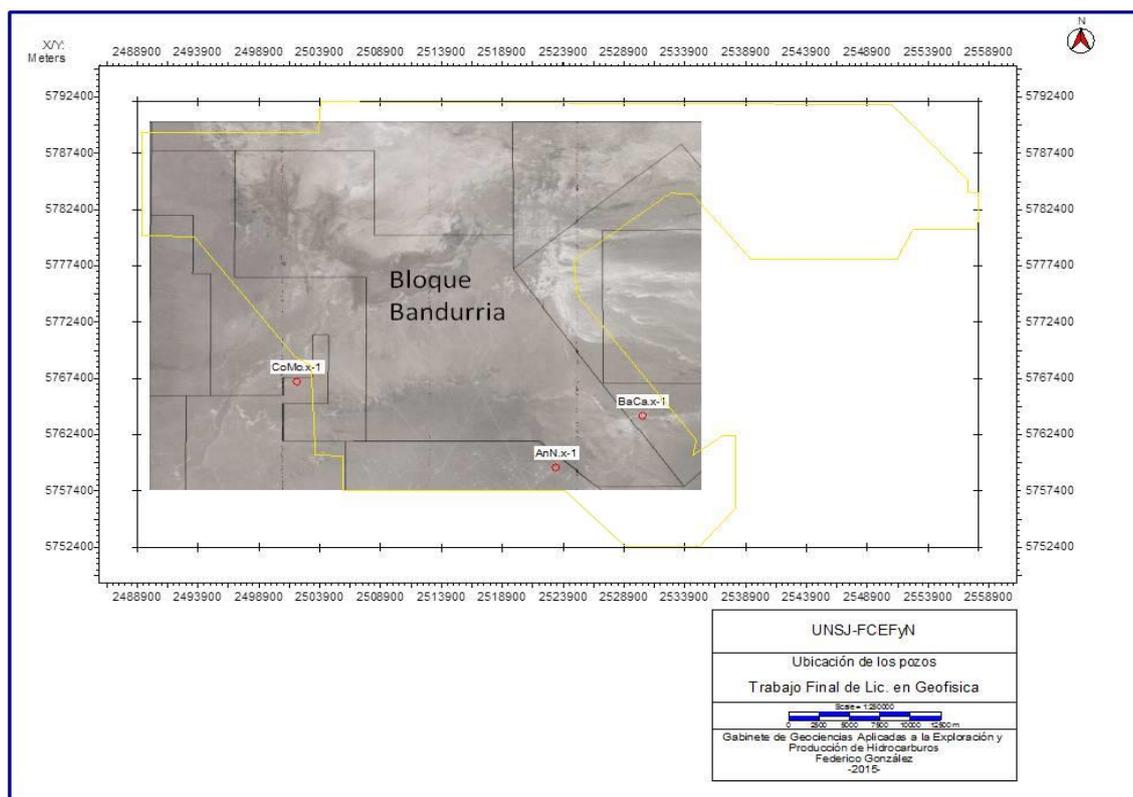


Figura 17: Ubicación de los pozos (círculos rojos) en el contexto del área estudiada. Delimitado por una línea negra aparece el bloque de concesión Bandurria, mientras que el área cubierta por la sísmica 3D aparece delimitada por una línea amarilla.

Para comenzar a cargar la información de los pozos se seleccionó la opción *Wells* → *Add Wells* en la ventana principal del programa. Luego se abrió una ventana donde se fueron completando los datos de los pozos (Fig. 18). Estos datos incluyeron:

- *Well name*: nombre del pozo.
- *Well number*: número del pozo.
- *Elevation*: elevación del nivel de referencia sobre el nivel del mar
- *Elevation reference*: es el nivel de referencia elegido para expresar las profundidades dentro del pozo. En este caso se usó el nivel de la superficie del terreno (*ground level*).
- *Surface Location*: aquí se colocaron las coordenadas del pozo.
- *Surface elevation*: elevación de la superficie en la posición del pozo
- *Total depth*: profundidad total del pozo

- *Borehole name*: por defecto el primer pozo es el principal (*main*). Si el pozo es ramificado se debe crear otro *borehole* e identificarlo con otro nombre distinto al principal.
- *UWI (Unique Well Identification)*: conjunto de caracteres alfanuméricos que constituyen la identificación única del pozo. Consta del área de estudio, el nombre del pozo y el número asociado a este.
- *Symbol*: aquí seleccionamos el símbolo con el que queremos visualizar el pozo dentro del *base map*.
- *Bottom Hole Location*: son las coordenadas del fondo del pozo. Si el mismo es vertical va a coincidir con la *Surface Location*.
- *Start Depth y End Depth*: son las profundidades inicial y final entre las que se corrieron los registros.

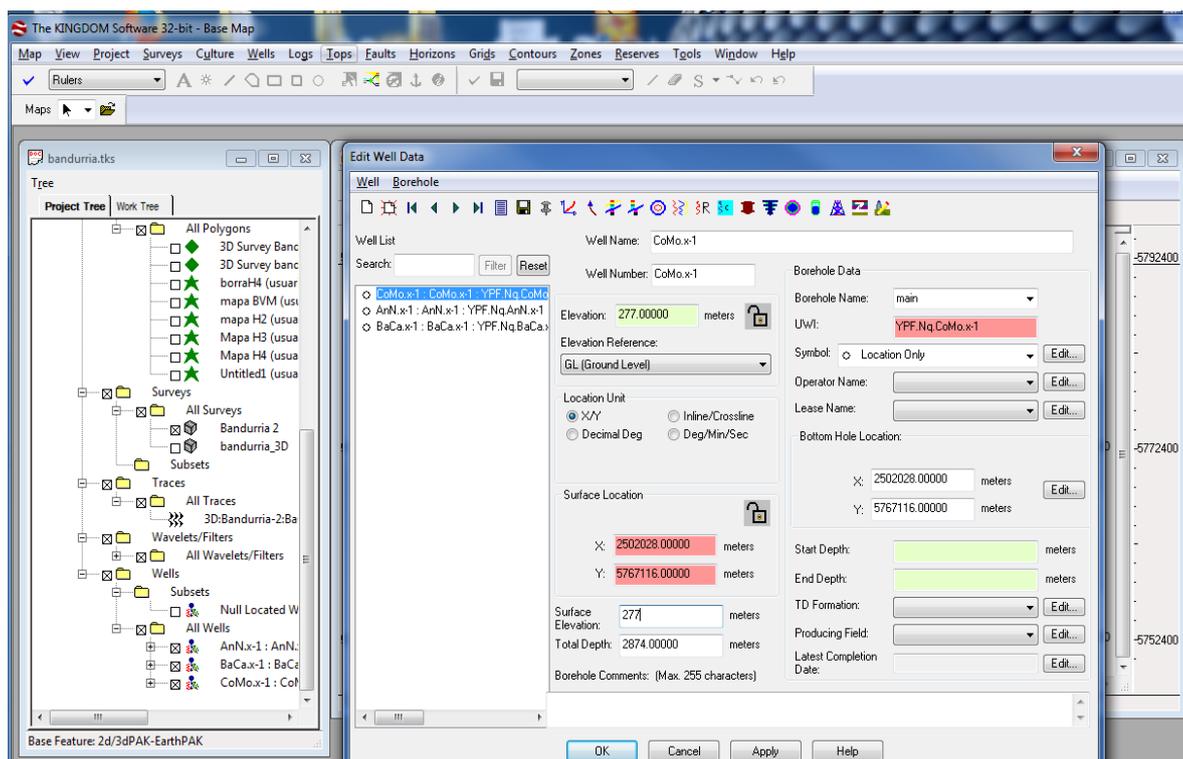


Figura 18: Ventana donde se completan los datos de los pozos.

Posteriormente se procedió a la carga de los registros eléctricos. Para ello, en la ventana de la Figura 18 se seleccionó la opción *Borehole* → *Log curves* → *Import*. Esta opción permite importar las curvas de pozo (archivo LAS) que se desean cargar (Fig. 19).

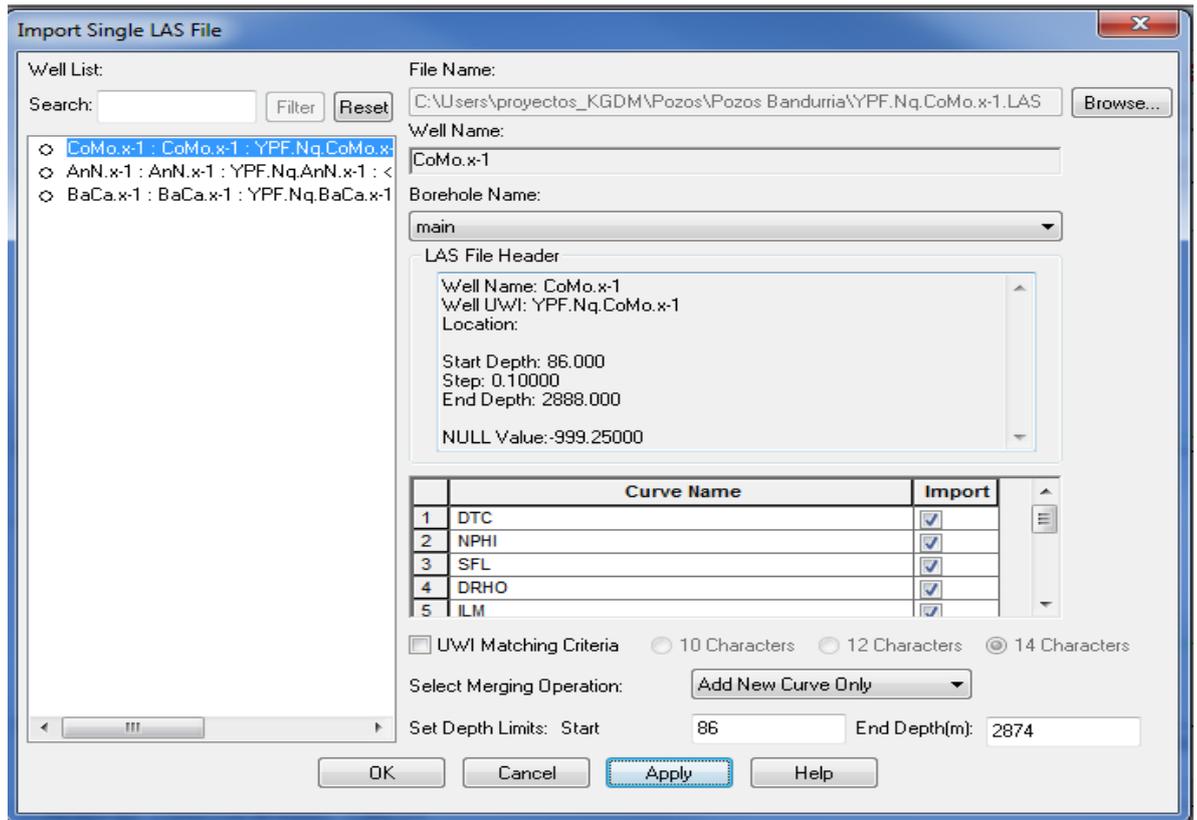


Figura 19: Selección de los registros de pozo que se desean importar.

En último lugar, después de haber cargado los perfiles eléctricos de los pozos se cargaron los topes (o pases) formacionales. Esta información es de suma utilidad ya que los topes pueden vincularse con los registros de pozo y también con la sísmica. Antes de cargar los topes fue necesario crearlos. Para ello, en la ventana principal del software, se seleccionó *Tops* → *Formation Top Management*. En la nueva ventana que se desplegó (Fig. 20) se fueron seleccionando los nombres y abreviaturas de los pases formacionales, como así también el tipo y estilo de línea con el que iban a ser visualizados junto con los registros.

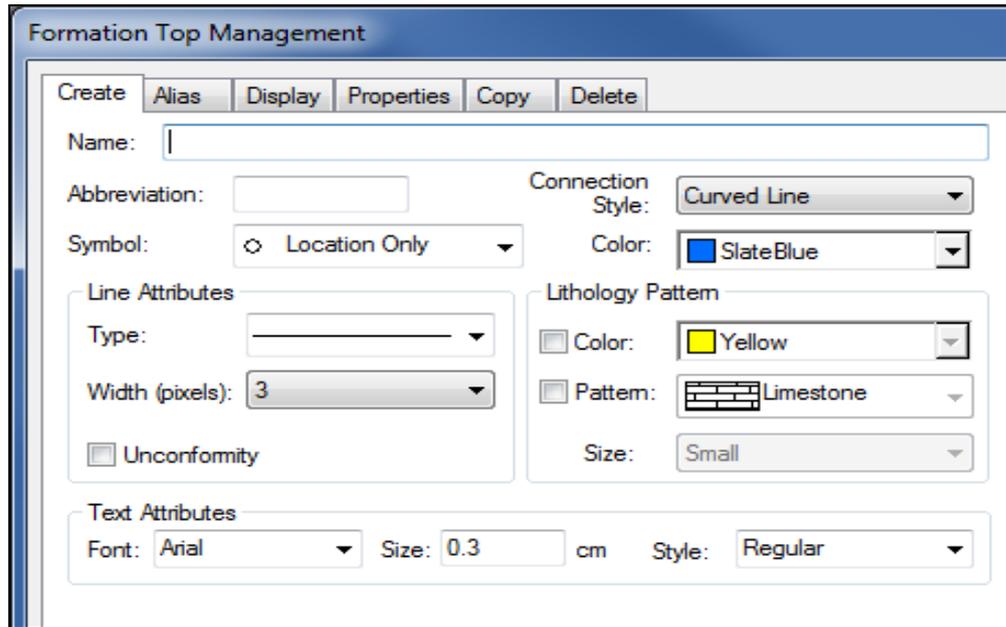


Figura 20: Ventana donde se crean los topes formacionales

Posteriormente se editaron las profundidades de los topes mediante la opción *Tops* → *Edit Formation Tops*. Luego de creados y editados, los topes se pudieron visualizar junto con los registros eléctricos de los pozos, tal y como se ve en la Figura 21.

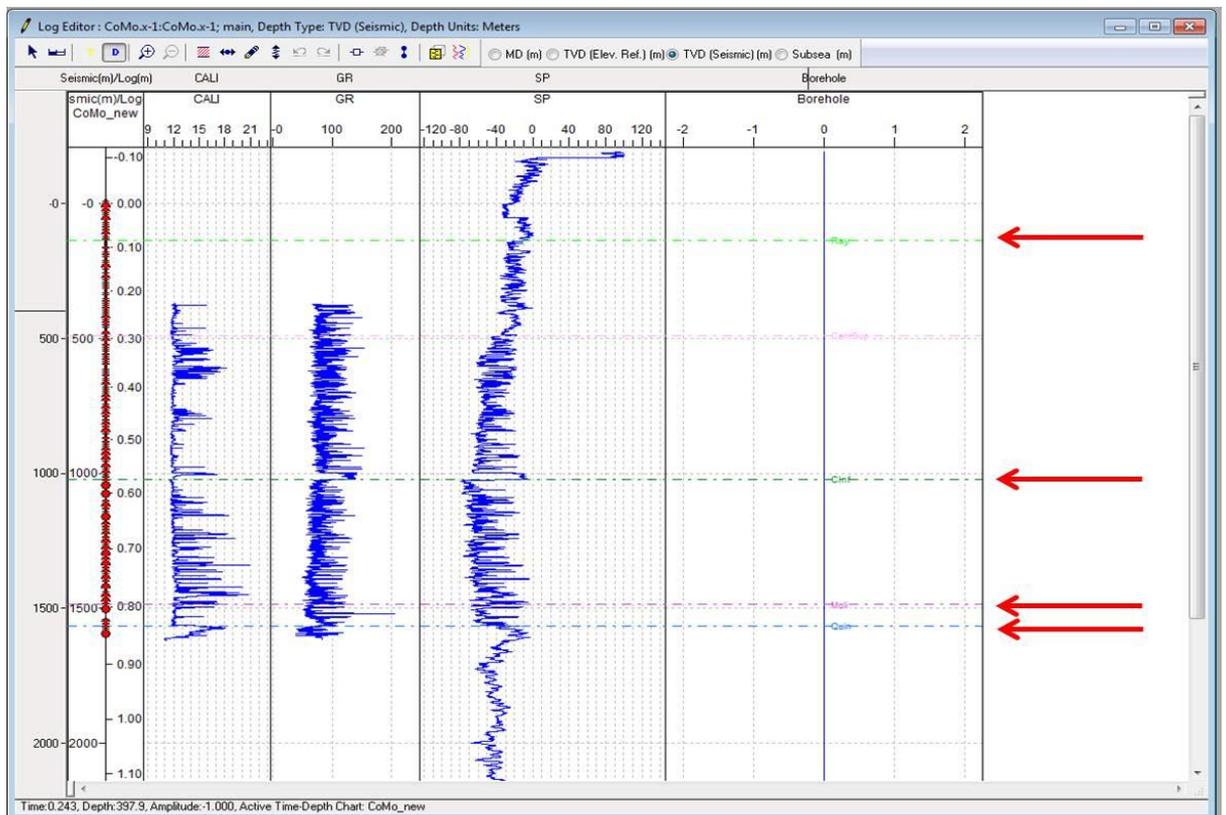


Figura 21: Visualización de los registros de los pozos junto con los topes formacionales

## 4.5 Interpretación de horizontes guía

Luego de visualizar la sísmica mediante el software, se procedió a seleccionar los horizontes guía para interpretar. El criterio de selección fue que los mismos tuvieran una gran amplitud y una buena continuidad areal, de manera tal que fuera relativamente fácil reconocerlos en todo el cubo sísmico. A continuación se mencionan los horizontes interpretados indicando sus polaridades y los colores utilizados para identificarlos (Fig.22):

- ✓ Base de Vaca Muerta (BVM): positivo-celeste
- ✓ Tope de Quintuco (Top QCO): positivo-verde
- ✓ Intra Quintuco 1 (Intra QCO 1): negativo-amarillo
- ✓ Intra Quintuco 2 (Intra QCO 2): positivo-violeta
- ✓ Filón Loma de Las Yeguas (LLY): positivo-azul

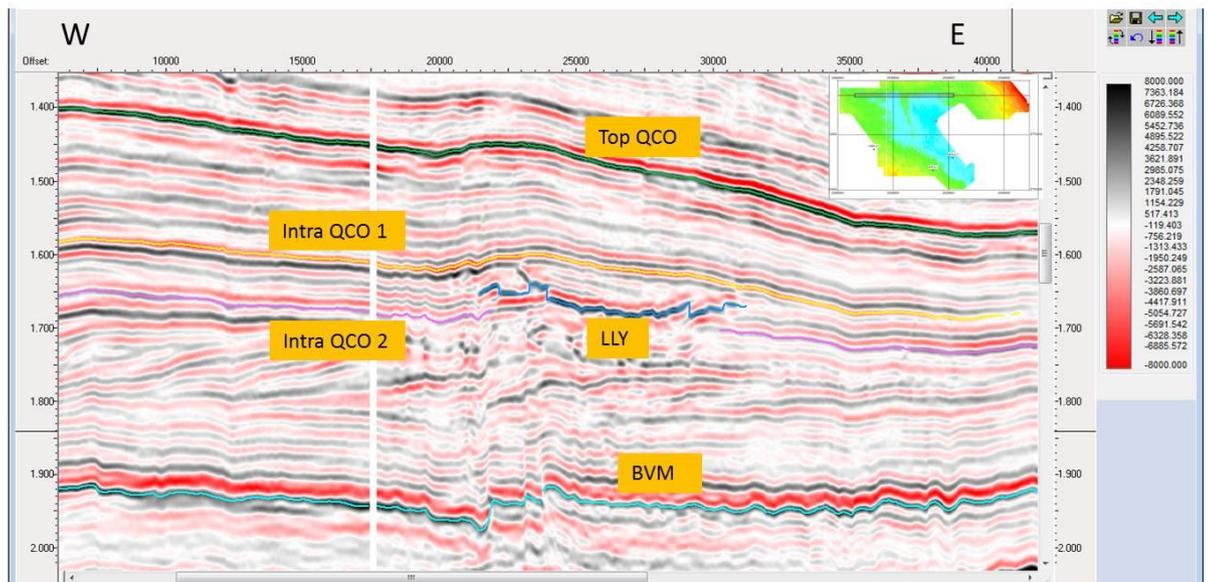


Figura 22: Línea sísmica oeste-este donde se muestran los 5 horizontes interpretados

Los primeros horizontes que se interpretaron fueron BVM y Top QCO ya que eran los más sencillos de picar por sus grandes valores de amplitudes y continuidad lateral en todo el cubo sísmico. El picado se realizó cada 40 líneas, tanto en las *crosslines* (dirección de la fuente sísmica utilizada) con orientación W-E como en las *inlines* (líneas sísmicas en dirección de los receptores) con orientación N-S. Una vez finalizado este proceso se obtuvo un mallado de interpretación para cada uno de los horizontes. A partir de allí se realizó una interpolación utilizando la herramienta 3D

*Hunt*, obteniéndose una continuidad de la interpretación en toda el área. Este proceso de interpolación se repitió para los 5 horizontes trabajados.

Posteriormente se picaron los horizontes Intra QCO 1 e Intra QCO 2 cada 20 y 10 líneas por tener una menor continuidad en ciertos sectores del cubo. Mientras que LLY, el último de los horizontes en ser interpretado, se picó cada 5 líneas ya que, como se detallará más adelante, está presente en un pequeño sector dentro de la sísmica y además tiene una geometría irregular.

A partir de los horizontes interpretados se elaboraron mapas estructurales en tiempo, mapas de amplitud sísmica y un mapa de espesor entre Top QCO y BVM.

#### **4.6 Sismogramas sintéticos: vinculación de los datos de pozos con la sísmica de reflexión**

La creación de sismogramas sintéticos es una parte fundamental del trabajo de los intérpretes. La finalidad de dichos sismogramas es vincular los datos de los pozos (datos discretos, expresados en profundidades) con los datos sísmicos (datos continuos, expresados en tiempo). Este proceso se conoce como “colgado de pozos”.

Un sismograma sintético, en su forma más simple, se puede considerar como la convolución entre un pulso sísmico de entrada (ondícula) y una serie de tiempo llamada “función de reflectividad”. Esta última está constituida por una serie de picos cuya amplitud es proporcional al coeficiente de reflexión de cada interfase y cuyo tiempo es el de la onda reflejada allí (ida y vuelta) (Kearey *et al.*, 2002). Por lo tanto la función de reflectividad representa los contrastes de impedancias acústicas en el medio estratificado (Fig.23).

Los valores de impedancia acústica necesarios para obtener la función de reflectividad pueden ser obtenidos directamente de un perfil sónico (o acústico) y un perfil de densidad, aunque también es posible asumir una densidad constante en caso de no contar con este registro. Debido a que la amplitud y polaridad de la reflexión sísmica se determina a partir del contraste de impedancia acústica, los grandes cambios en estos perfiles coinciden con reflectores de gran amplitud en el sismograma sintético resultante.

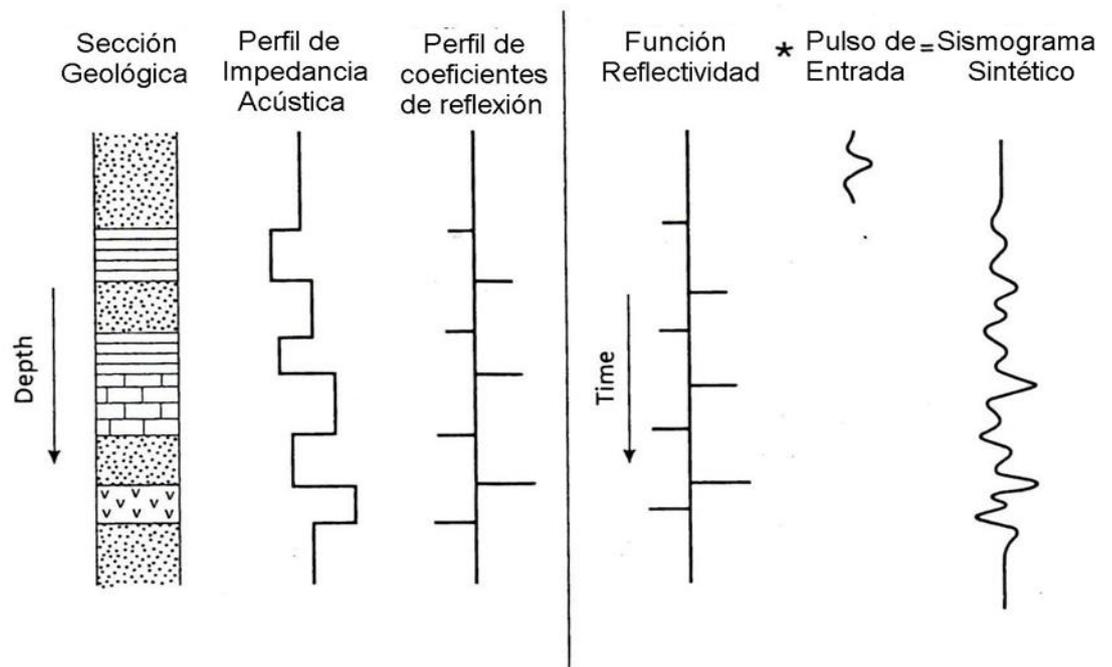


Figura 23: Esquema teórico del sismograma sintético (Modificado de Kearey *et al.*, 2002).

El software IHS Kingdom permite la creación automática de los sismogramas sintéticos a partir de los perfiles acústicos y de densidad compensada. Dichos perfiles fueron manipulados para tratar de eliminar lecturas erróneas e inconsistentes producidas, por ejemplo, por el desmoronamiento de ciertos sectores de los pozos y la lectura del tubo del casing en los primeros metros de profundidad. Además de estos perfiles, el software nos pide una curva de pozo para usar como referencia (se utilizó el gamma ray) y una serie de trazas sísmicas extraídas de las cercanías del pozo. A partir de estas trazas se puede comparar el sintético con la sísmica y lograr el correcto ajuste del mismo (es decir el colgado propiamente dicho) (Figs. 24 y 25).

En este trabajo se generaron los sismogramas sintéticos correspondientes a los pozos AnN.x-1 y BaCa.x-1 ya que son los que están dentro del dato sísmico.

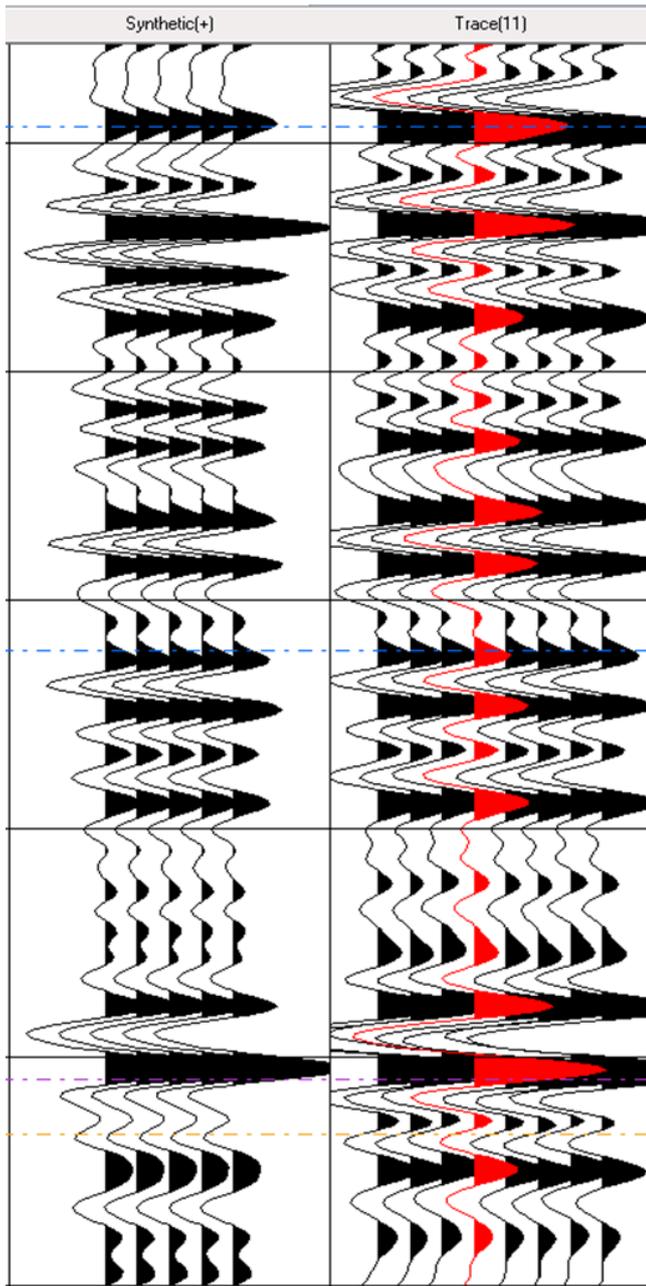


Figura 24: Ajuste entre el sismograma sintético (izquierda) y la traza sísmica (derecha) luego de efectuado el colgado del pozo. Nótese como los máximos y mínimos de amplitud del sintético coinciden con los de la traza sísmica.

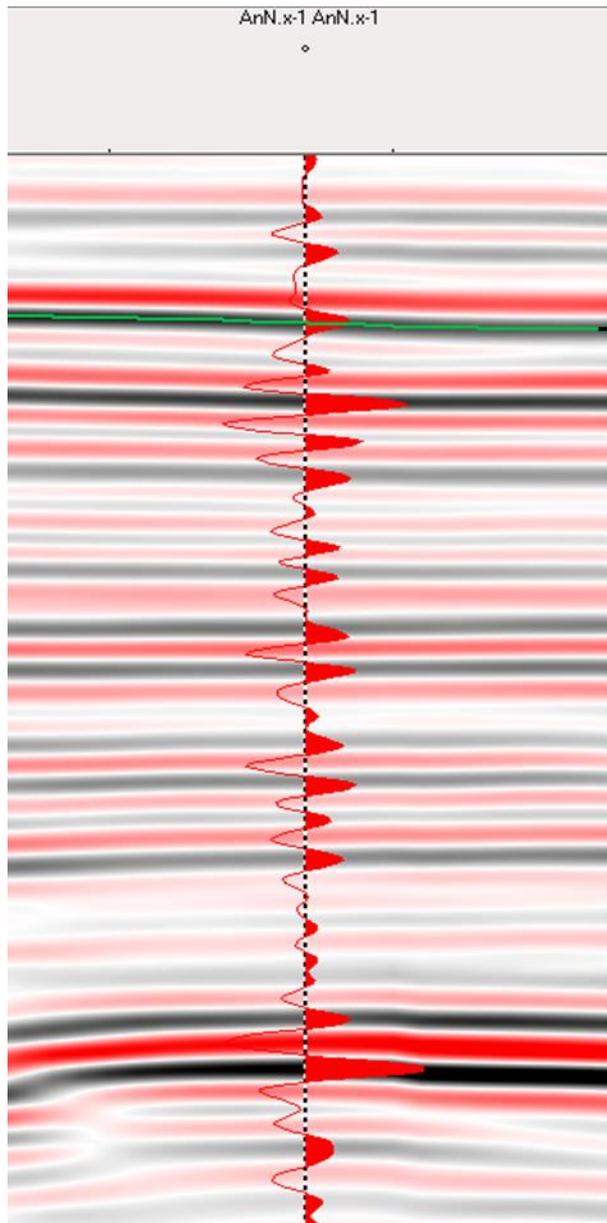


Figura 25: Línea sísmica arbitraria a través del pozo AnN.x-1 donde se observa el s. sintético colgado y los horizontes sísmicos BVM y Top QCO.

#### 4.7 Correlación entre los pozos

Luego de realizar el correcto colgado de los datos de pozos a la sísmica, y en conjunto con la información de los pases formacionales de cada uno de ellos, se procedió a correlacionar sus perfiles eléctricos.

Gracias a la correlación entre los perfiles de los pozos es posible ver como varían las posiciones de los pases formacionales en cada uno de ellos, como así también los cambios en las curvas de pozo asociados a dichos pases. De acuerdo a esto se confeccionan secciones entre pozos que pueden ser estructurales o estratigráficas. En el caso estructural se observan las posiciones de los horizontes en su estado actual de deformación. Mientras que en el caso estratigráfico se presentan los

horizontes realizando un previo “aplanamiento” de algún reflector guía, lo cual muestra de manera aproximada la ubicación que poseían los mismos al momento de depositarse dicho reflector “aplanado”.

Las Figuras 26, 27, 28 y 29 muestran dos secciones entre pozos, una estructural y una estratigráfica; como así también las líneas sísmicas que pasan por la misma ubicación.

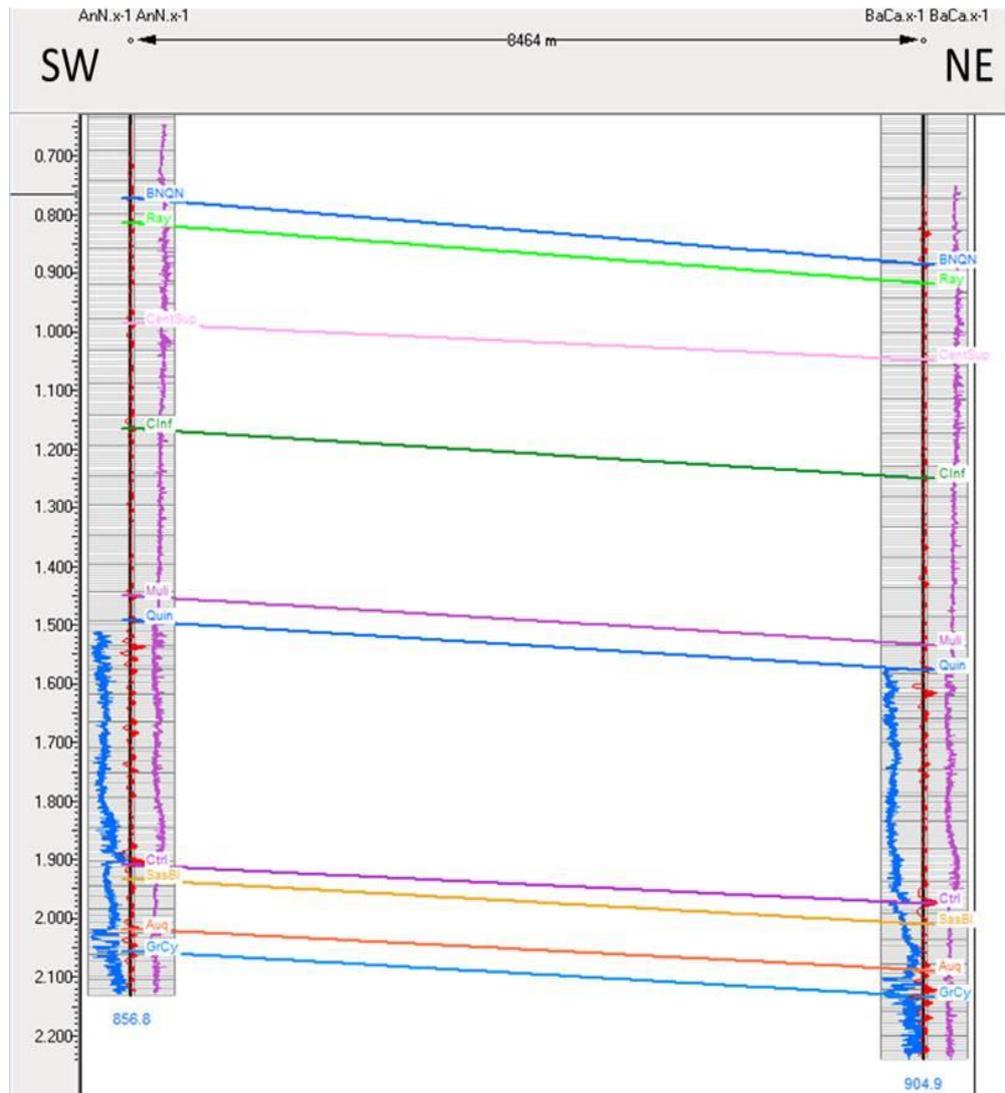


Figura 26: Sección entre pozos de tipo estructural

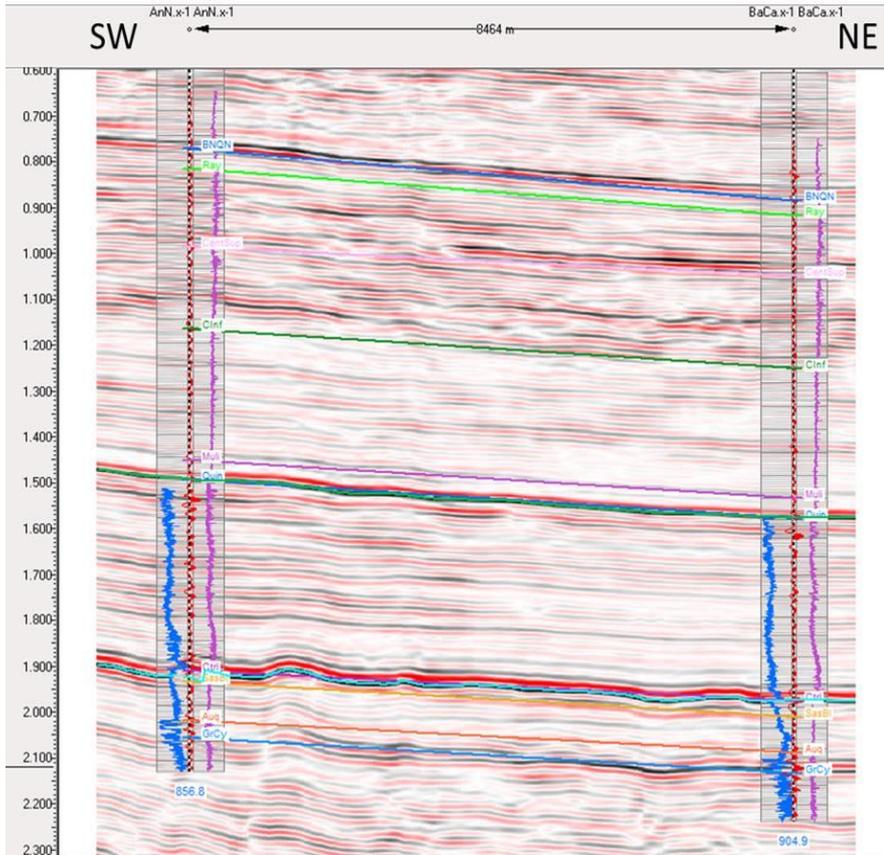


Figura 27: Línea sísmica arbitraria que pasa por la misma ubicación que la sección entre pozos mostrada en la Figura 14

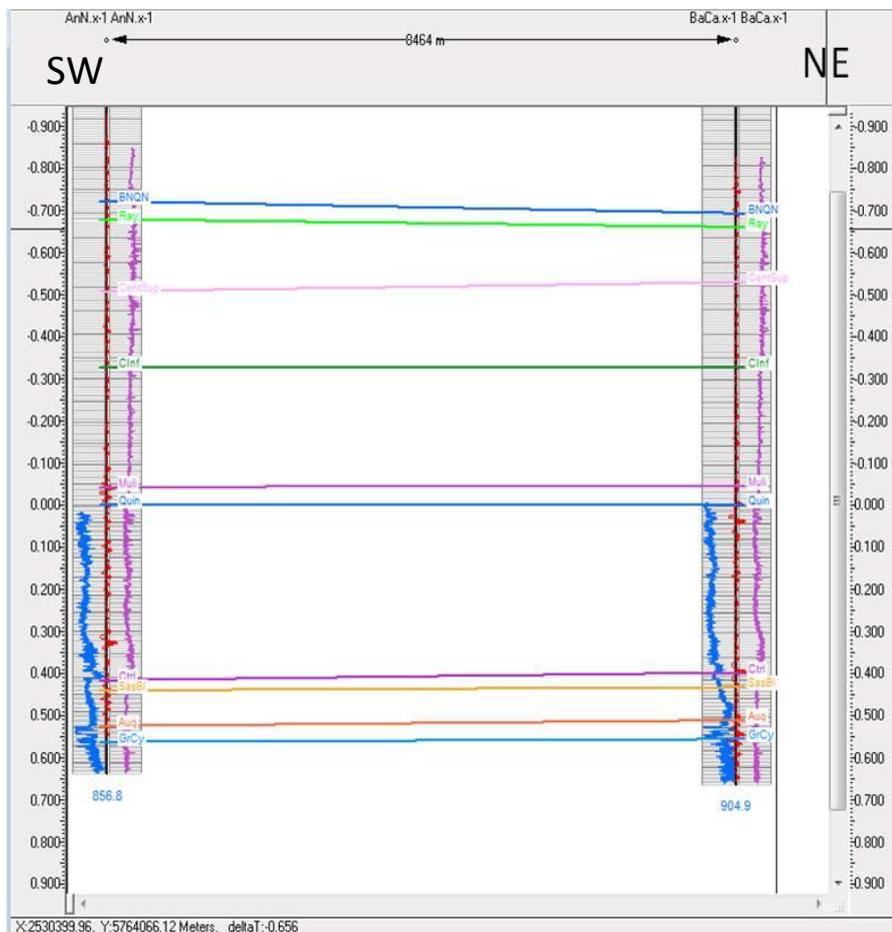


Fig.28: Sección entre pozos de tipo estratigráfica aplanada al nivel del tope de Quintuco

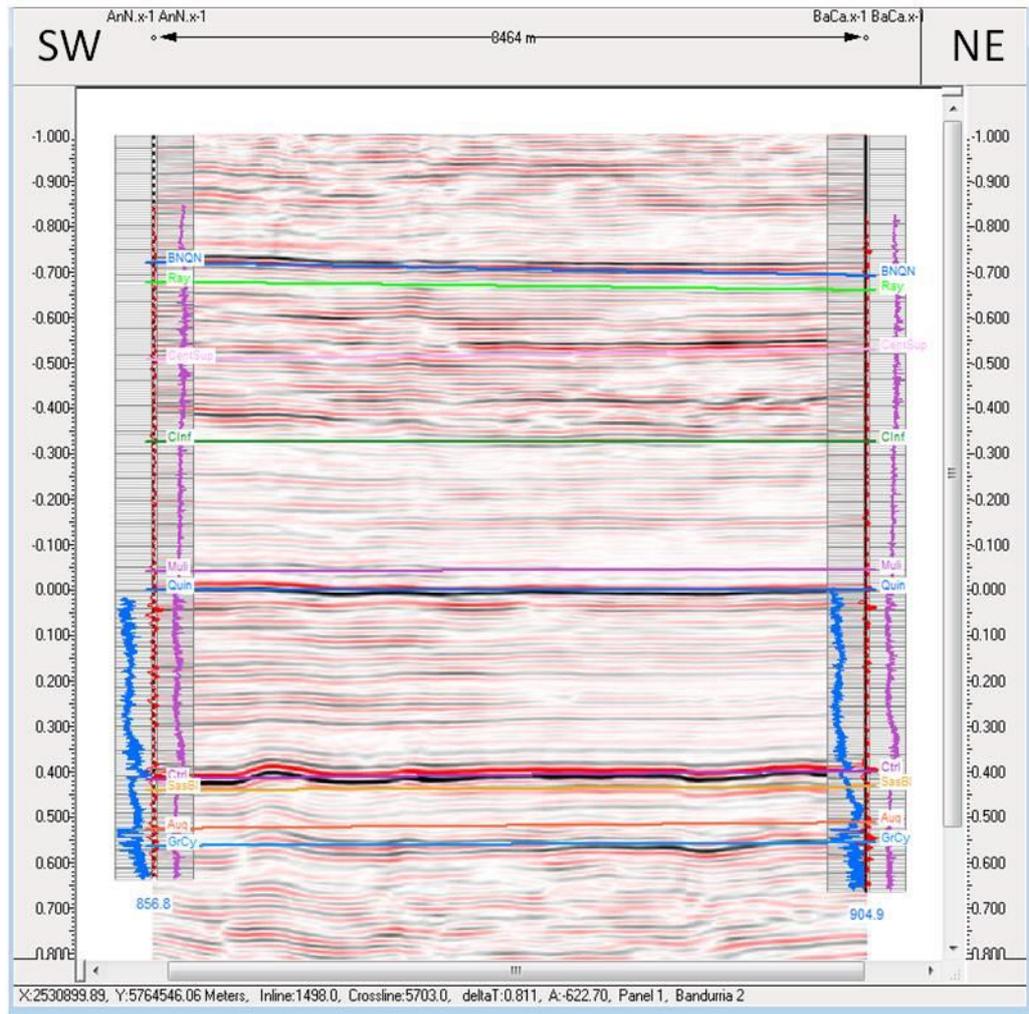


Figura 29: Línea sísmica arbitraria que pasa por la misma ubicación que la sección entre pozos mostrada en la Figura 16, con el tope de Quintuco aplanado.

## **5 DESCRIPCIÓN ESTRUCTURAL DEL INTERVALO QUINTUCO-VACA MUERTA**

En el presente capítulo se analizarán desde el punto de vista estructural los horizontes interpretados en este trabajo, a excepción del horizonte LLY que se analizará en el capítulo siguiente.

Para realizar dicho análisis se utilizaron los mapas estructurales en tiempo elaborados durante la interpretación de los reflectores guías. Estos mapas expresan el tiempo de ida y vuelta de la onda sísmica hasta el horizonte en cuestión (*Two Way Travel Time*, a partir de ahora *TWT*) en milisegundos. En cuanto a la escala de colores utilizada, los colores fríos representan las mayores profundidades, mientras que los colores cálidos representan las profundidades más someras.

Los mapas estructurales en tiempo son muy similares a los mapas estructurales en profundidad, pero están sujetos a una distorsión asociada con variaciones laterales o verticales de velocidad en el intervalo de subsuelo que sobreyace al reflector. A pesar de esto constituyen una muy buena aproximación para analizar el comportamiento estructural de los horizontes.

También se utilizó un mapa de espesores sísmicos en tiempo (cuya metodología es restar los tiempos entre dos horizontes) y mapas de extracción de amplitudes. Estos últimos muestran como varia la amplitud del evento a lo largo de su extensión dentro del cubo sísmico, permitiendo también el reconocimiento de rasgos estructurales de importancia.

### **5.1 Base de Vaca Muerta (BVM) y Tope de Quintuco (Top QCO)**

Estos dos horizontes representan los límites inferior y superior de la sección analizada en este trabajo, el Intervalo Qco-Vaca Muerta. Además son los que tienen mayor continuidad areal y mayor amplitud.

La Fig. 30 muestra el mapa estructural de la Base de la Fm. Vaca Muerta. En el mismo se puede apreciar que la zona más profunda de este horizonte se ubica en la parte central; mientras que hacia los bordes del cubo, más precisamente en las direcciones SW y NE, el horizonte se vuelve más somero. Estas variaciones de profundidad indican la presencia de un pliegue de tipo sinclinal cuyo eje axial tiene un rumbo NW-SE. Este pliegue constituye un segmento del Bajo de Añelo, estructura de carácter regional que se describió en el capítulo 3, sección 2.2.

La Fig. 31 muestra una línea sísmica de dirección SW-NE en la que se visualiza claramente esta estructura, y cómo afecta a todo el paquete sedimentario estudiado. Por dicha razón este rasgo estructural aparece también en los demás horizontes tratados en este capítulo.

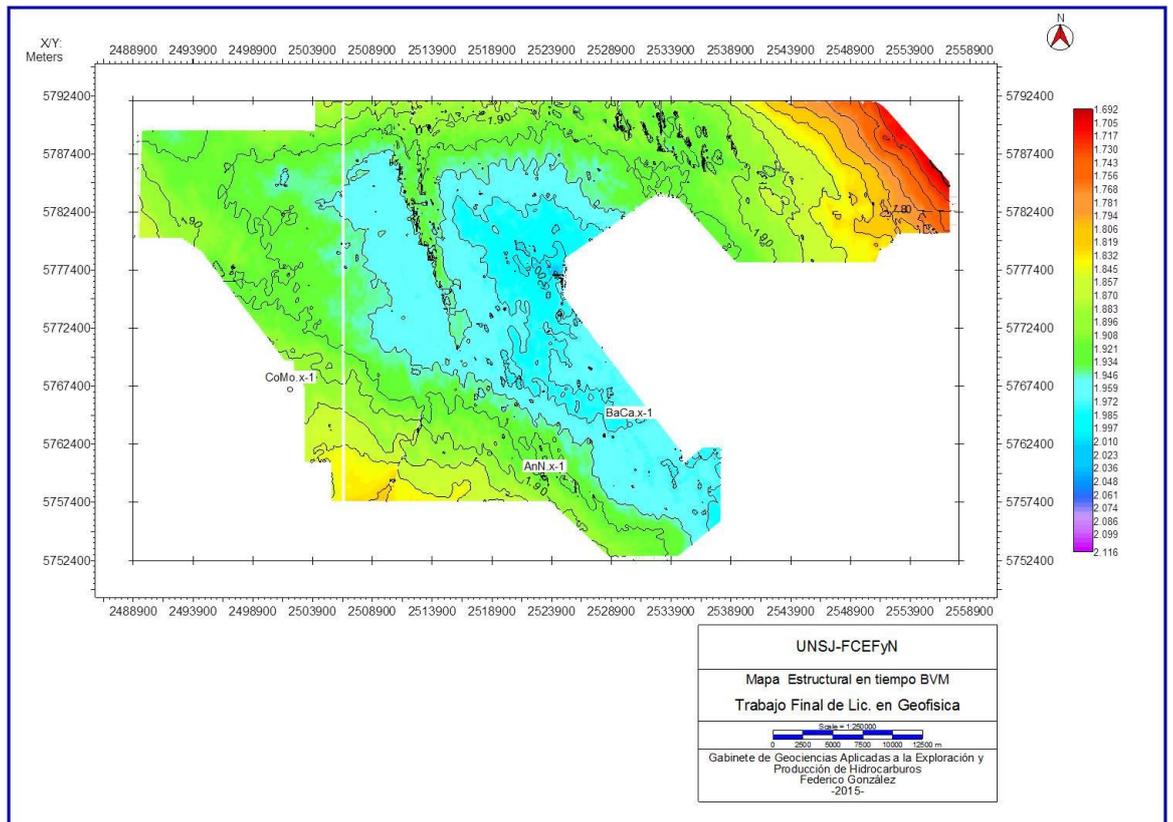


Figura 30: Mapa estructural en tiempo de la Base de la Fm. Vaca Muerta

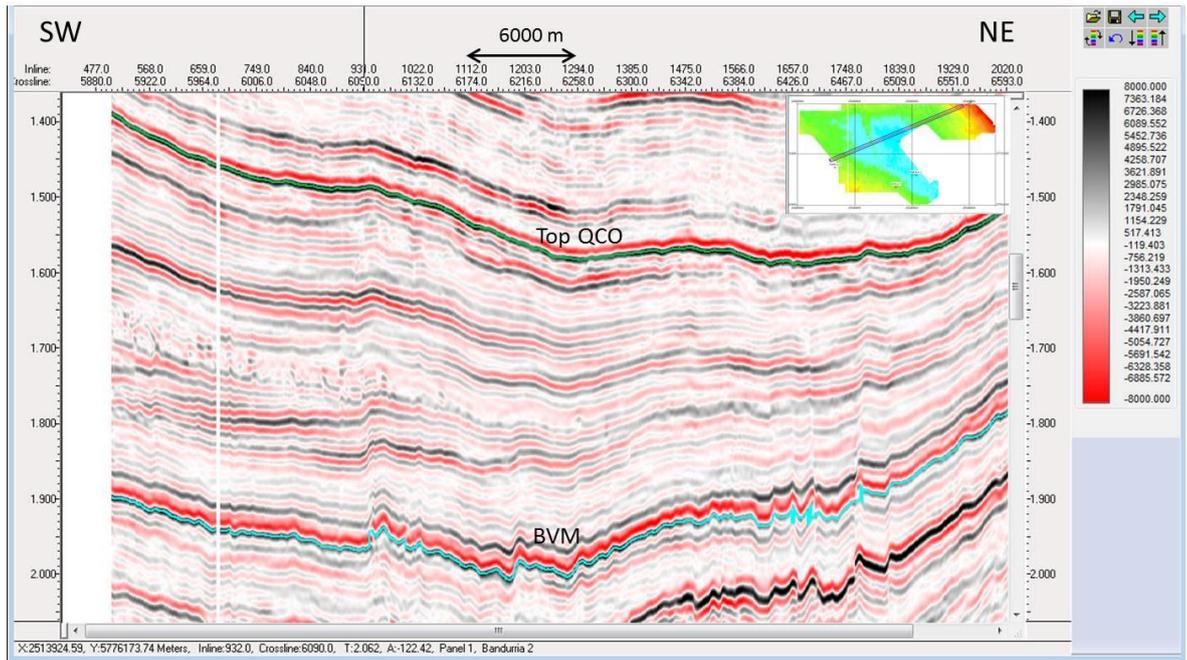


Figura 31: Línea sísmica arbitraria en dirección SW-NE donde se ve claramente el sinclinal del Bajo de Añelo, y como afecta al intervalo Qco- Vaca Muerta.

El mapa estructural de BVM también indica la presencia de una falla de gran extensión, de rumbo NNW-SSE en el sector centro-oeste del mapa, como así también un conjunto de fallas paralelas de menor longitud y con rumbo NW-SE en el extremo noreste del mapa.

Para este horizonte se generaron dos mapas de amplitud sísmica. En el primero de ellos (Fig.32) se visualiza claramente la falla de mayor longitud y, en menor medida el tren de fallas paralelas en el noreste del cubo. Modificando la escala de colores se generó un segundo mapa de amplitud sísmica (Fig.33) en el que se distinguen con mayor claridad todas estas fallas.

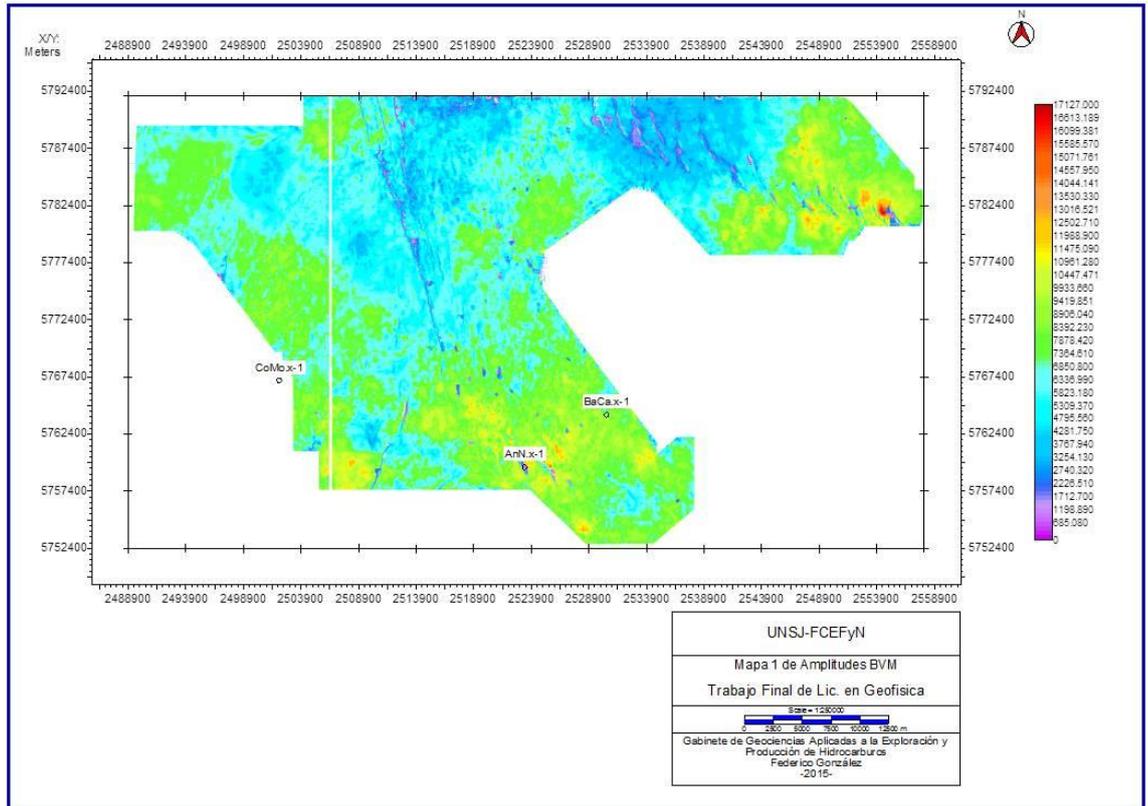


Figura 32: Mapa 1 de amplitudes de BVM

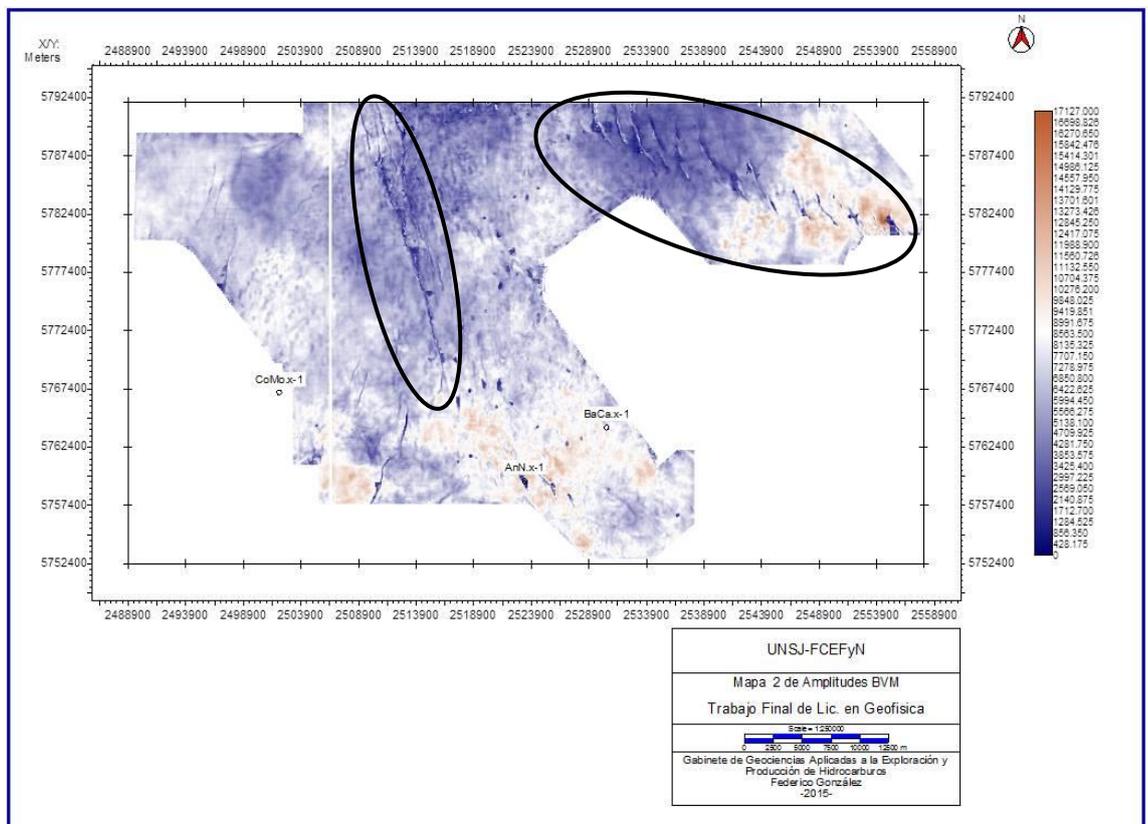


Figura 33: Mapa 2 de amplitudes de BVM. Remarcadas con líneas negras aparecen la falla de mayor extensión, en el centro del mapa, y el tren de fallas paralelas en el sector noreste.

Para analizar un poco mejor estas fallas se desplegaron dos líneas sísmicas arbitrarias. La primera de ellas (Fig.34) atraviesa la falla central. En esta línea podemos ver que se trata de una falla inversa con escaso rechazo. Se observa también otra falla inversa aledaña con menor rechazo que la anterior.

Según Gangui y Grausem (2014) estas fallas están relacionadas con fenómenos de acomodamiento debido a movimientos que afectan el basamento y grábenes Precuyanos. Estas estructuras profundas se desacoplan frecuentemente de las sedimentitas suprayacentes a nivel del yeso Auquilco, aunque también, aunque menos comúnmente, pueden ser reactivaciones de fallas “Cuyanas”, que cortan el yeso Auquilco afectando la Fm Vaca Muerta. Según Gangui y Grausem (2014) estas fallas son multiepisódicas desarrollándose durante el Tithoniano superior-Berriasiano medio y localmente fueron reactivadas durante la deformación Cretácico tardío-Cenozoica.

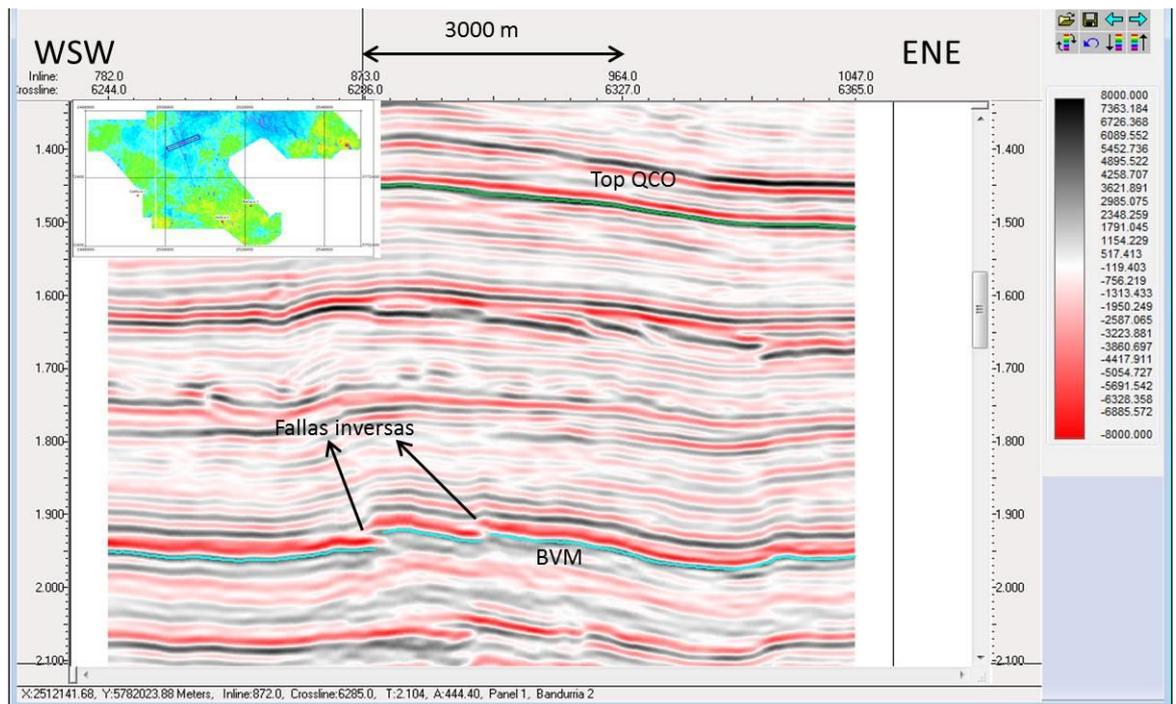


Figura 34: Línea sísmica arbitraria en dirección oeste suroeste-este noreste donde se ven las fallas inversas que afectan la base de la Fm. Vaca Muerta.

La segunda línea sísmica (Fig. 35) se desplegó con la finalidad de observar el tren de fallas paralelas en el sector noreste. A partir de ella se pudo concluir que son fallas normales prácticamente verticales. Presentan un rechazo moderado que es

máximo (aprox. 28 ms) en los horizontes inferiores a BVM (Fms. Tordillo y Auquilco) y que disminuye dentro de la Fm. Vaca Muerta, desapareciendo antes de llegar al techo de la Fm. Quintuco.

Según Gangui y Grausem (2014) son fallas normales alineadas en dirección NW-SE en arreglo “en-echelón” asociadas a la reactivación transcurrente dextral de lineamientos Cuyanos enraizados en el basamento (sean rifts o lineamientos del Jurásico inferior y medio). Estas fallas son multiépisódicas, desarrollándose durante el Jurásico Medio Tardío afectando desde los niveles medios y superiores del Gr Cuyo hasta el Tithoniano superior en algunos sectores, con la generación de pliegues de arrastre (Gangui y Grausem op.cit.).

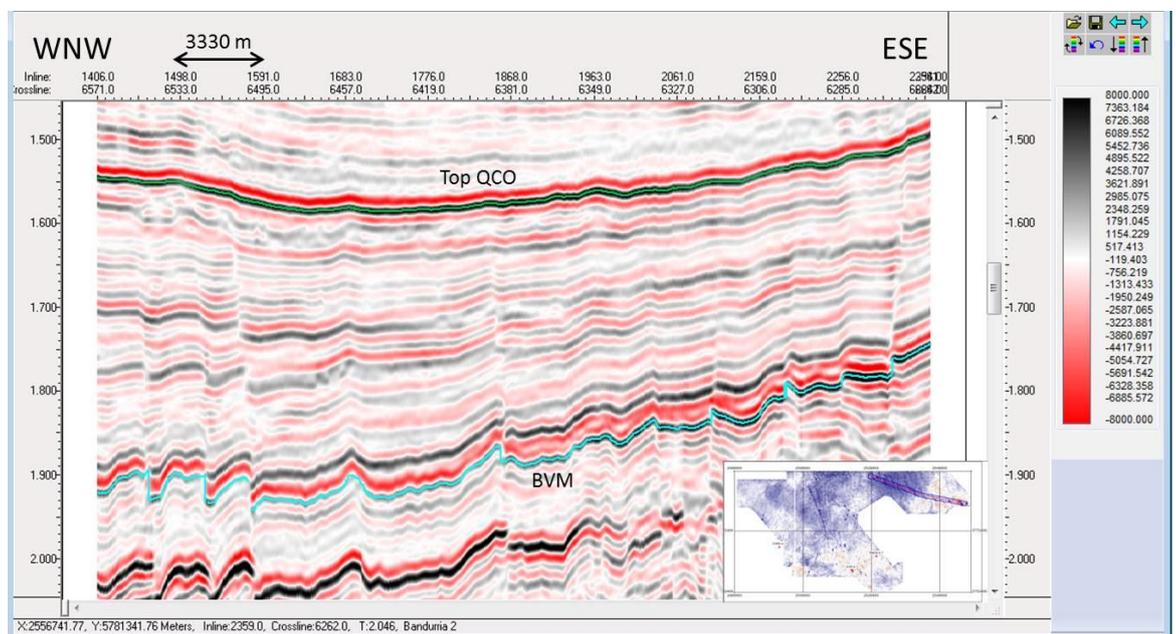


Figura 35: Línea sísmica arbitraria en dirección oeste noroeste-este sureste donde se observan las fallas “en echelón” en el sector noreste del cubo sísmico.

En cuanto al tope de Quintuco (Top QCO), en su mapa estructural (Fig.36) podemos ver también que la parte central es la más profunda para este horizonte, mientras que hacia el oeste y hacia el este se vuelve más somero. Esto es causado justamente por el sinclinal del Bajo de Añelo.

No se detectan rasgos estructurales asociados a fallas, lo cual indica que las fallas existentes en la zona de estudio no alcanzan a este horizonte.

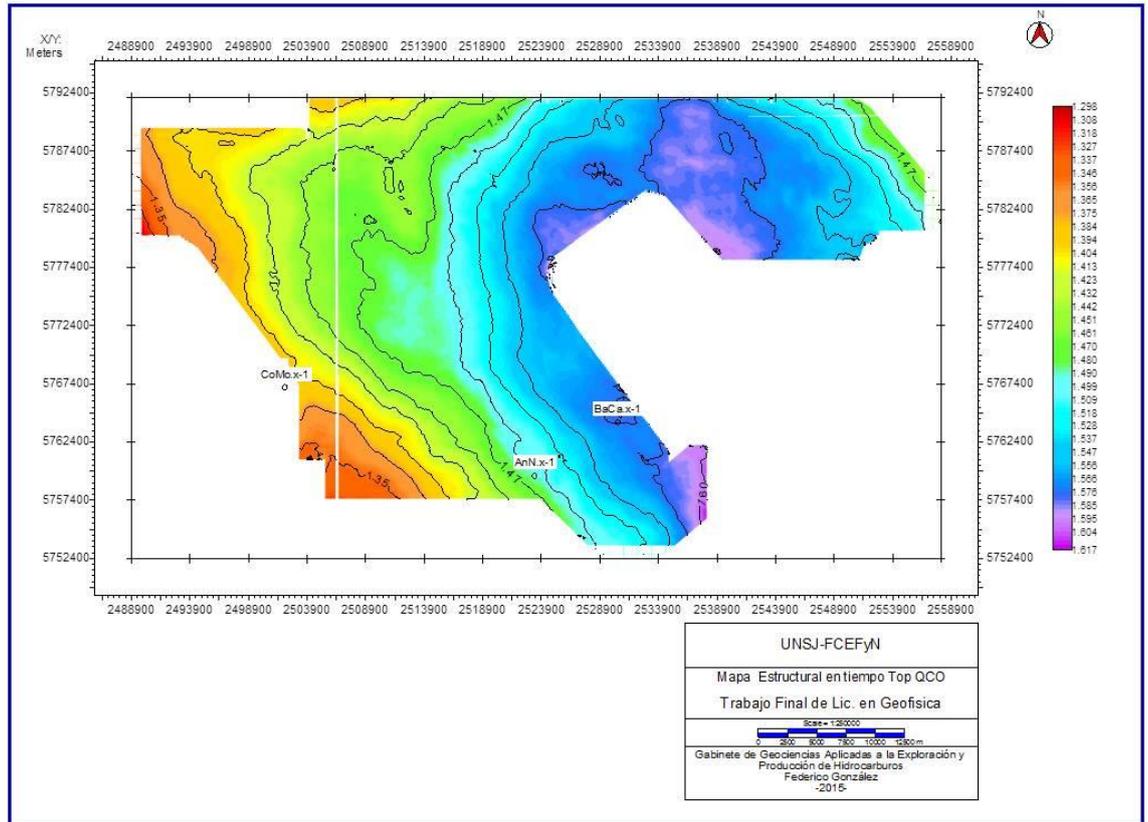


Figura 36: Mapa estructural en tiempo al tope del Intervalo Qco-Vaca Muerta.

La Figura 37 corresponde al mapa de extracción de amplitudes que se obtuvo para este horizonte. En él podemos ver que al igual que BVM los valores de amplitud son bastante altos, lo cual indica un gran contraste de impedancia acústica entre la Fm. Quintuco y las rocas que la sobreyacen. Esto es bastante lógico ya que la litología de la Fm. Quintuco es predominantemente carbonática (calizas, margas y dolomías) mientras que por encima se encuentran las areniscas de la Fm. Mulichinco. En el mapa se observan dos zonas de amplitudes anormalmente altas (colores cálidos) que se alinean en dirección SW-NE. Esto podría deberse a un cambio en las propiedades petrofísicas de Quintuco, lo cual generaría un contraste de impedancias aún mayor que en el resto del horizonte. Además, se observa un patrón de variaciones difuso alineado en dirección NW-SE, el cual sería perpendicular a la paleo-línea de costa. Estos pueden corresponder a variaciones laterales de facies debido al ambiente depositacional y/o a algún efecto diagenético post-sedimentario.

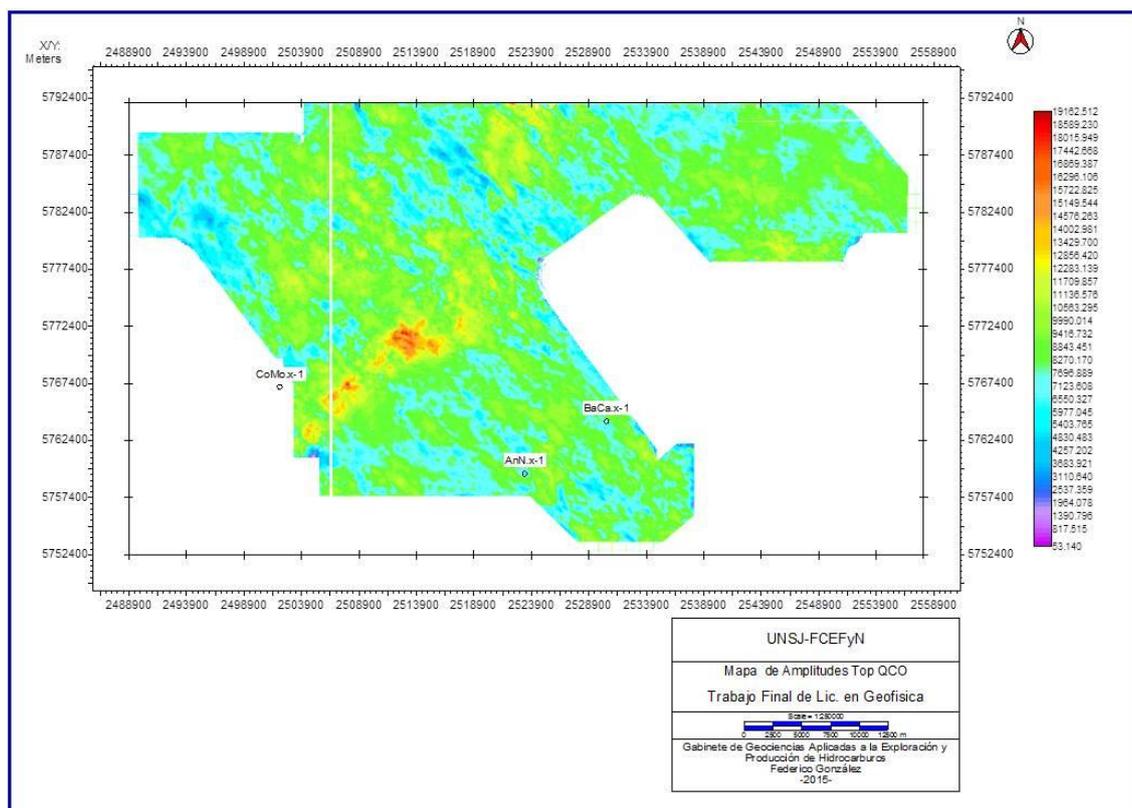


Figura 37: Mapa de amplitudes al tope de la Fm Quintuco.

### 5.1.1 Mapa isopáquico del Intervalo Quintuco-Vaca Muerta

Luego de analizar el comportamiento estructural de la base y el tope del Intervalo Quintuco-Vaca Muerta, se procedió a realizar un mapa de espesores (o mapa isopáquico) del mismo (Fig.38). Los colores cálidos muestran los menores espesores, y viceversa con los colores fríos.

En este mapa se distingue claramente como el espesor del paquete sedimentario aumenta desde el este-sureste hacia el oeste-noroeste. Esto está en concordancia con la disposición de la cuenca Neuquina, ya que hacia el este del Engolfamiento se encuentra el borde de la misma, lo que origina una paulatina disminución de su relleno sedimentario en esa dirección.

Otro rasgo llamativo en el mapa de espesores es la presencia de contornos circulares en algunos sectores del mismo. Esto se debe a irregularidades topográficas en la Base de Vaca Muerta, lo cual provoca máximos y mínimos locales de espesor.

Para visualizar mejor la variación de espesor del Intervalo Qco-Vaca Muerta, como así también las irregularidades topográficas en su base, se desplegó una *crossline* (dirección oeste-este), mostrada en la Fig.39.

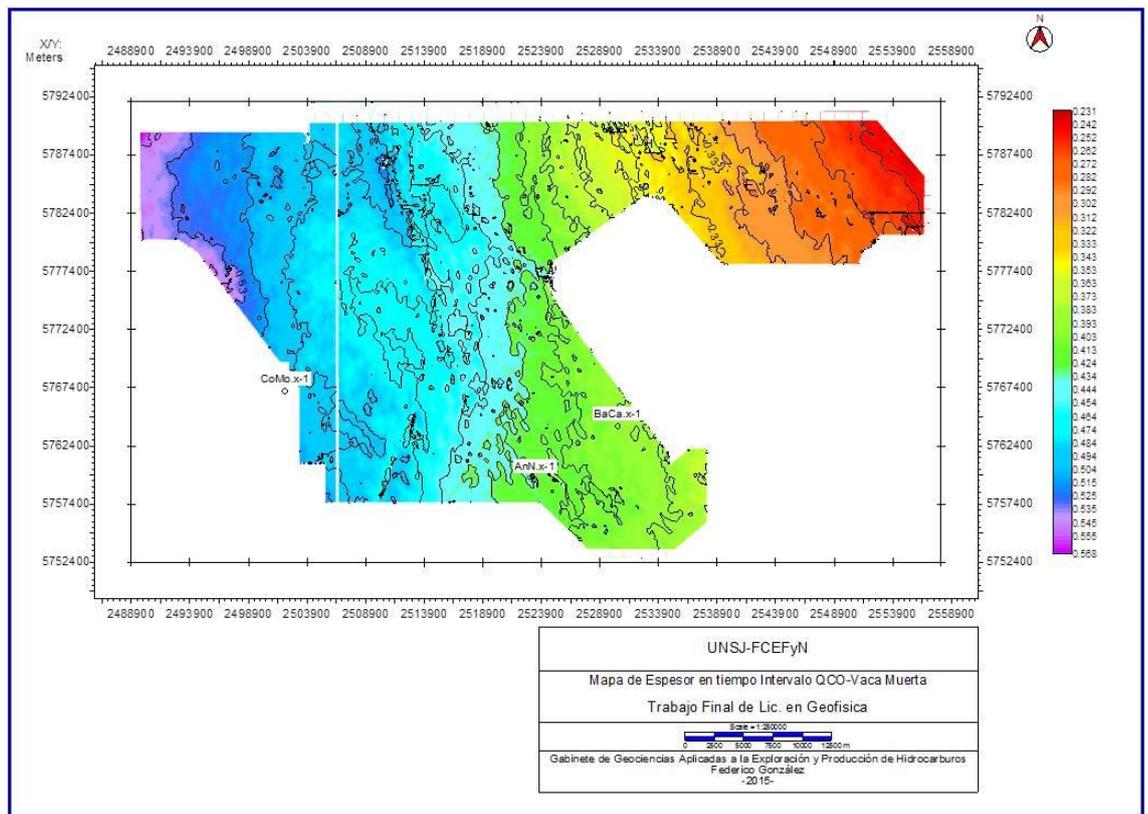


Figura 38: Mapa de espesores del Intervalo Quintuco-Vaca Muerta.

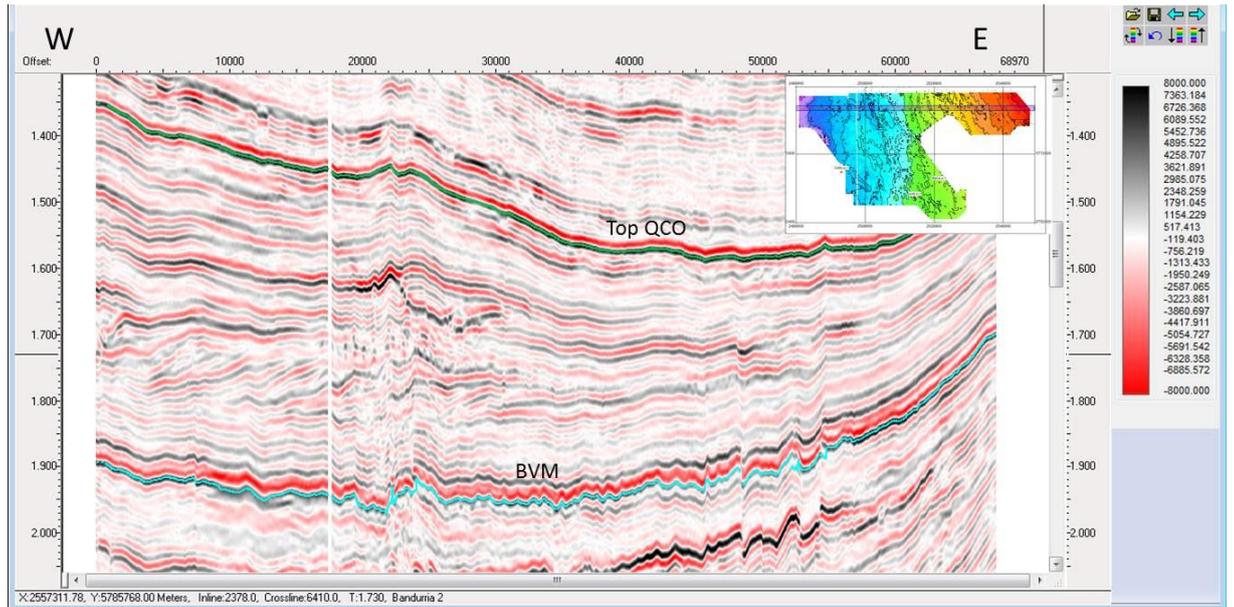


Figura 39: *Crossline* 6410 donde se ve la variación de espesor del Intervalo Quintuco Vaca Muerta. Nótese también las irregularidades en el horizonte BVM.

## 5.2 Horizontes Intra Quintuco 1 (Intra QCO 1) e Intra Quintuco 2 (Intra QCO 2)

Para caracterizar un poco más el Intervalo Quintuco-Vaca Muerta se interpretaron dos horizontes dentro del mismo: Intra QCO 1 e Intra QCO 2. El primero de ellos corresponde a un valle (polaridad negativa) y el segundo a un pico (polaridad positiva). En la Figura 40 se muestra una *crossline* donde se visualiza la posición de los mismos dentro del paquete sedimentario estudiado.

Como podemos ver, estos horizontes son paralelos y están separados unos 60 milisegundos aproximadamente. Como se verá más adelante, debido a esta poca separación entre ellos, sus mapas estructurales son semejantes, no así los mapas de amplitud sísmica.

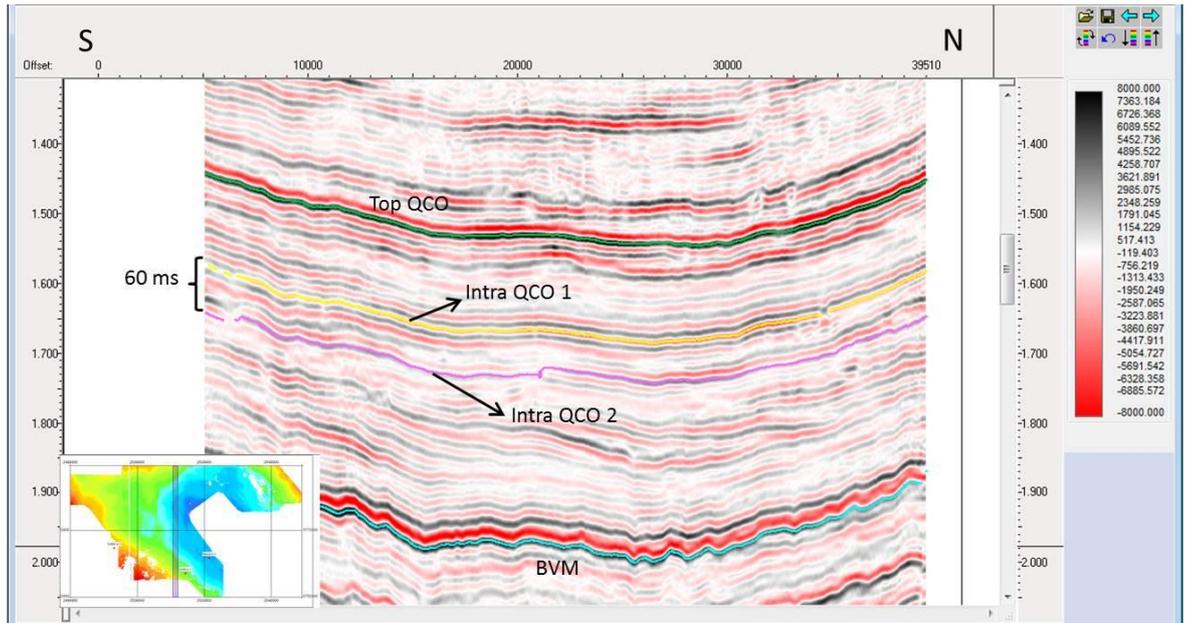


Figura 40: *Inline* 1144 donde se muestra la posición de los horizontes Intra QCO 1 (amarillo) e Intra QCO 2 (violeta) en el contexto del Intervalo estudiado.

A diferencia de Top QCO y de BVM, estos horizontes tienen amplitudes bastante menores y zonas donde se dificulta su interpretación. Esto indicaría que la litología es más uniforme por entre las unidades que producen estas reflexiones y por lo tanto los contrastes de impedancias acústicas no son tan altos como para generar reflexiones de gran amplitud.

A continuación se muestran los mapas de tiempo generados para estos horizontes (Figs. 41 y 42).

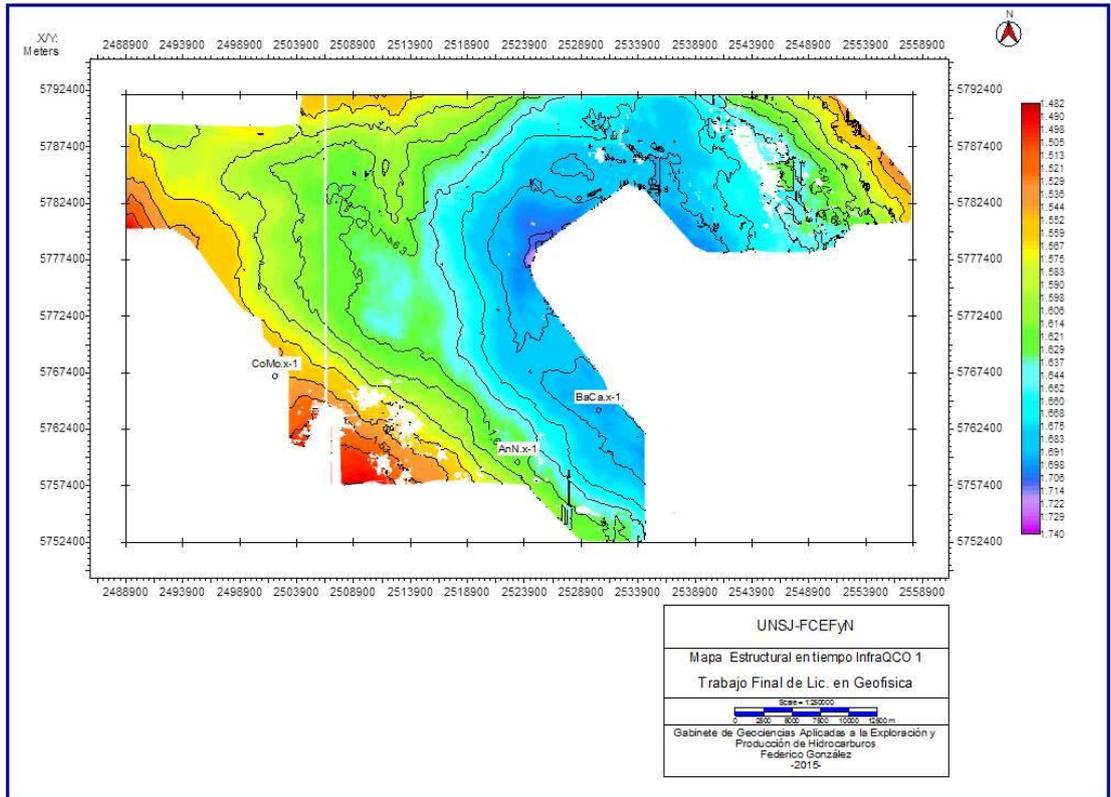


Figura 41: Mapa estructural del horizonte Intra QCO 1

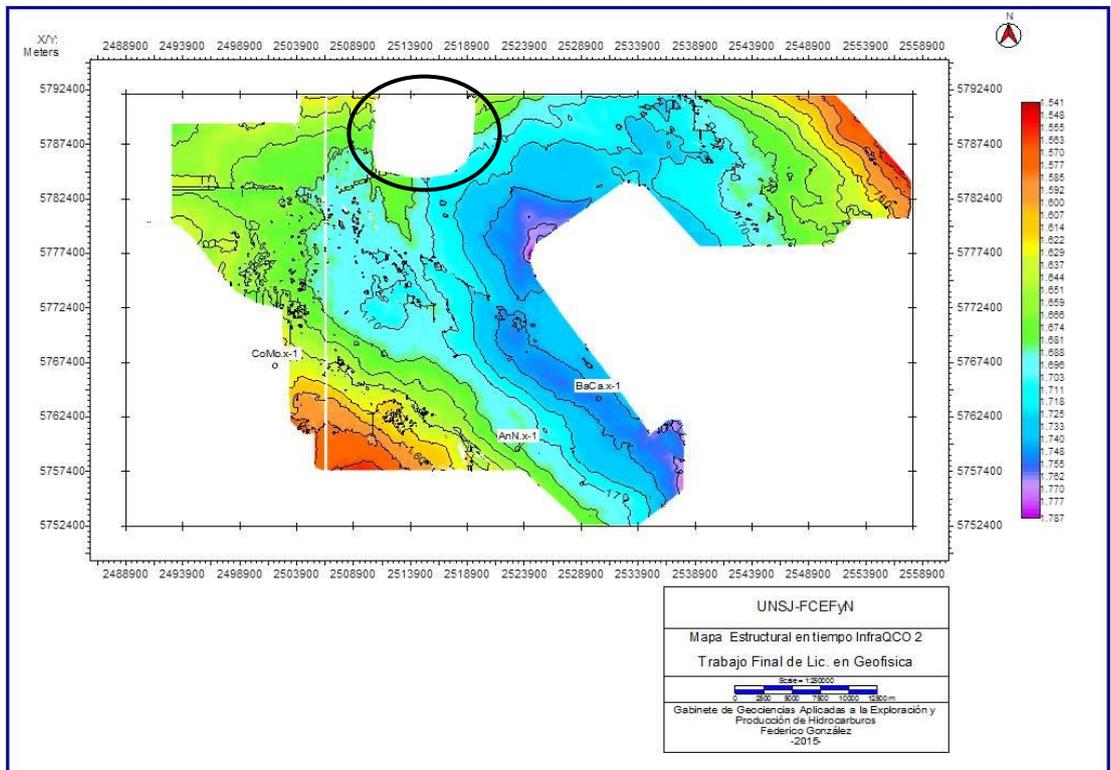


Figura 42: Mapa estructural del horizonte Intra QCO 2. Rodeada por una elipse aparece una zona donde el horizonte es atravesado por otra estructura, lo cual impide su seguimiento en ese sector.

Observando los mapas vemos claramente sus similitudes estructurales. También se observa cómo el sinclinal del Bajo de Añelo afecta a ambos.

En los bordes SW y NE del mapa de Intra QCO 1 se observan unos sectores no interpretados (en blanco), lo cual se debe a la pérdida de continuidad del horizonte. Esto puede deberse a cambios laterales en las propiedades petrofísicas de la roca, lo cual atenúa el contraste de impedancias acústicas con las rocas adyacentes.

En cuanto al mapa de Intra QCO 2 el rasgo más notable es un sector donde el horizonte “desaparece”. Dicho sector se destaca con una elipse negra en el mapa de la Fig. 42.

Las Figuras 43 y 44 corresponden a una *crossline* y una *inline* que cruzan el sector mencionado anteriormente. En ellas se observa la presencia de un reflector anómalo que atraviesa a Intra QCO 2 y a otros reflectores adyacentes.

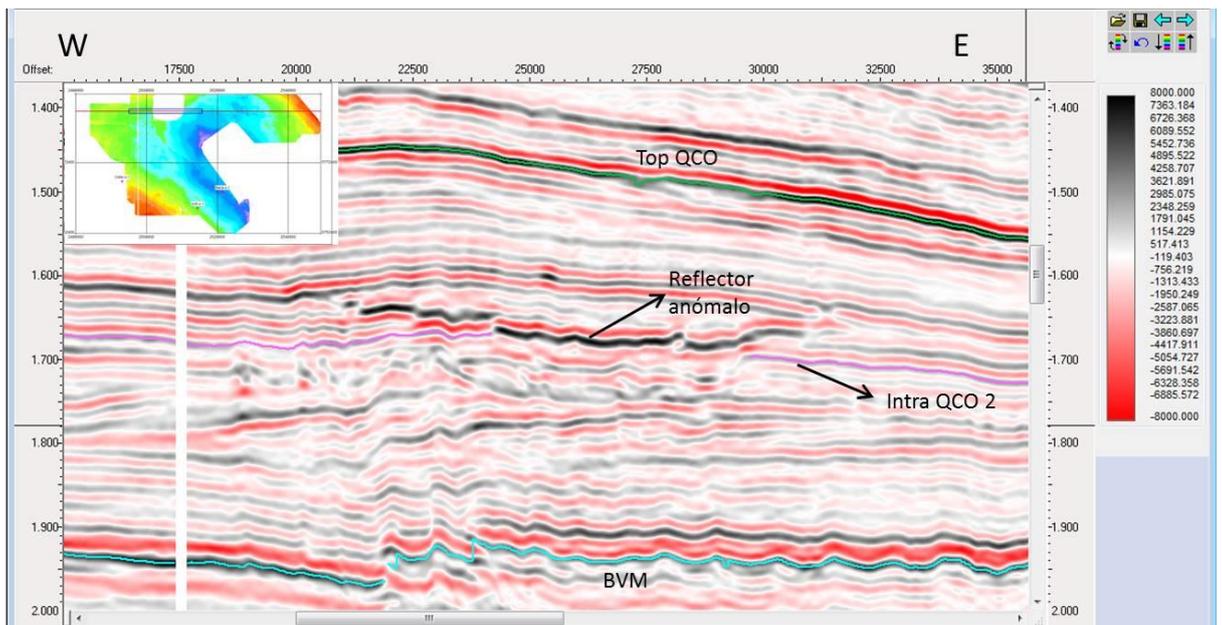


Figura 43: *Crossline* 6453 donde se observa el horizonte Intra QCO 2 y el reflector anómalo que lo atraviesa.

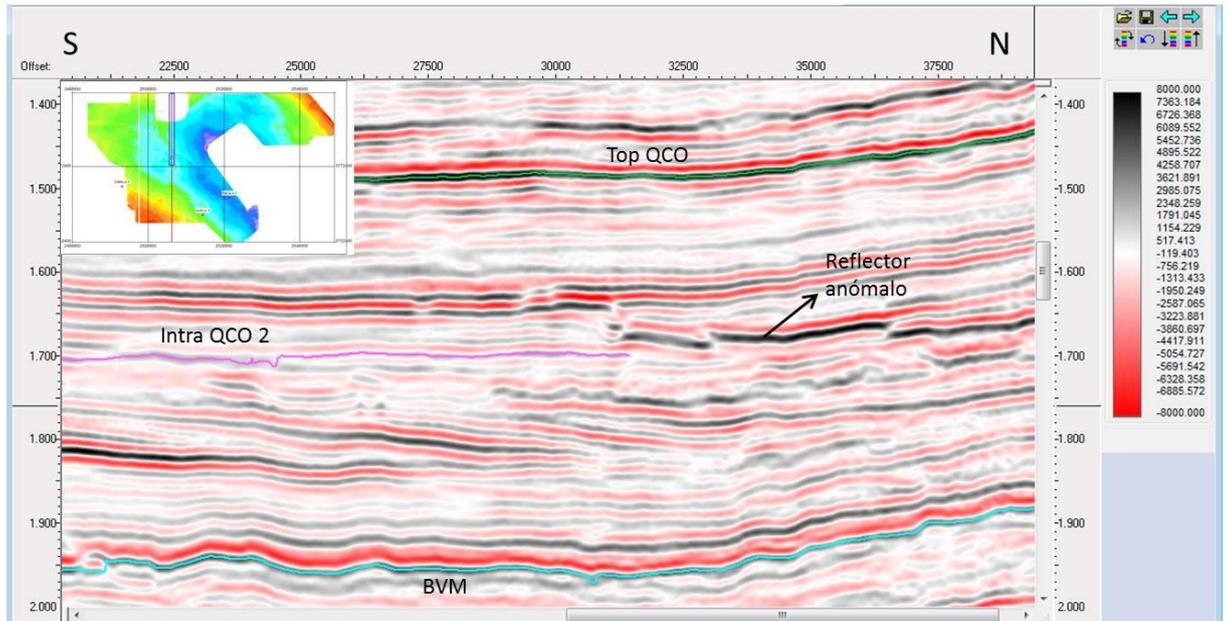


Figura 44: *Inline* 974 donde también se observa el reflector anómalo.

Este reflector anómalo aparece como un evento de gran amplitud sísmica que en algunos sectores tiene una disposición paralela a la estratificación (concordante), y en otros sectores oblicua (discordante).

Parte del dato sísmico interpretado en esta tesina fue abordado por los trabajos publicados sobre los yacimientos de Aguada San Roque y Loma de Las Yeguas (Comeron *et al.*, 2002), (González *et al.*, 2005). En los citados trabajos se interpreta esta anomalía sísmica como producto de una intrusión de tipo filoneana, la cual resulta ser el principal reservorio del yacimiento Loma de las Yeguas. En el capítulo siguiente se hará un análisis más profundo sobre éste intrusivo.

Al analizar los mapas de amplitud sísmica de estos horizontes se destacan características de interés en los de Intra QCO 2 (Figs. 45 y 46), los cuales se muestran con dos escalas diferentes. En ellos podemos observar una alternancia de amplitudes altas y bajas formando un lineamiento en dirección NW-SE. También se destacan una serie de anomalías de geometría subcircular en el sector oeste del mapa (más visibles con la escala de azul y rojo).

Varios autores (Orchuela y Musmara, 1982; Verzi *et al.*, 2002) reportan patrones sísmicos similares a éstos en los bloques vecinos de La Calera y Loma La Lata, que asocian a abultamientos carbonáticos que, en un principio, carecerían de interés petrolero.

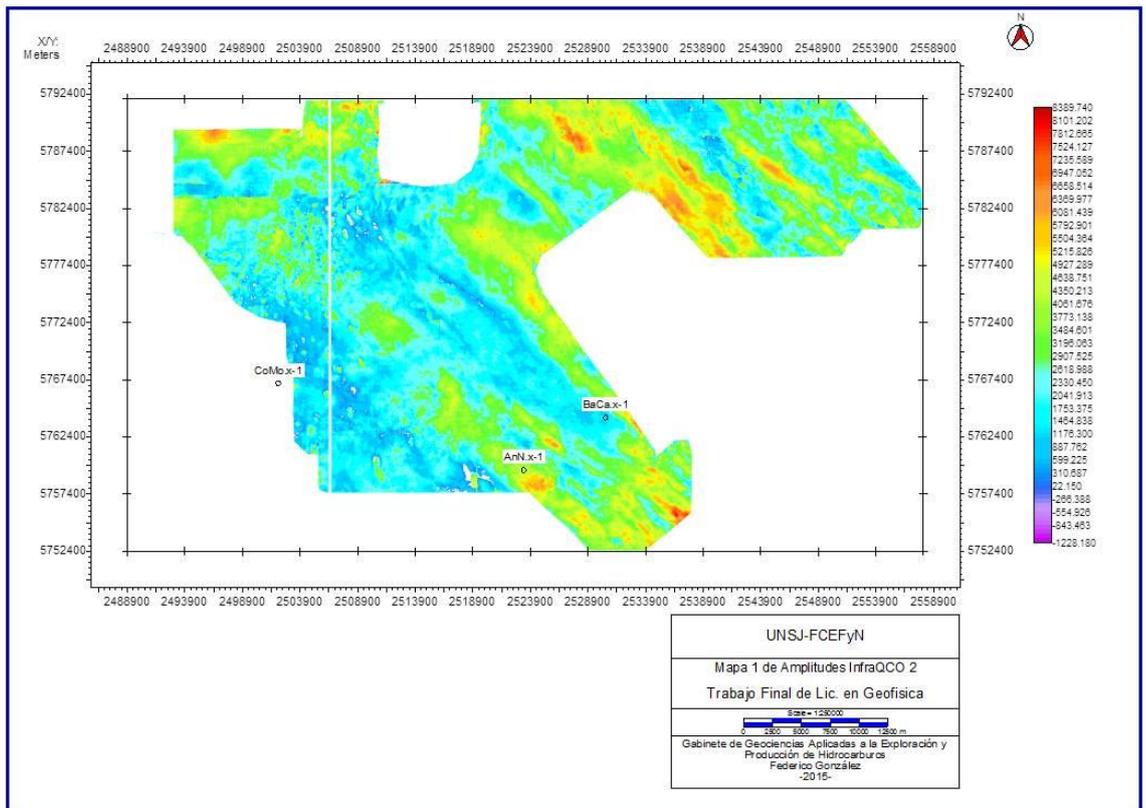


Figura 45: Mapa 1 de amplitudes de Intra QCO 2.

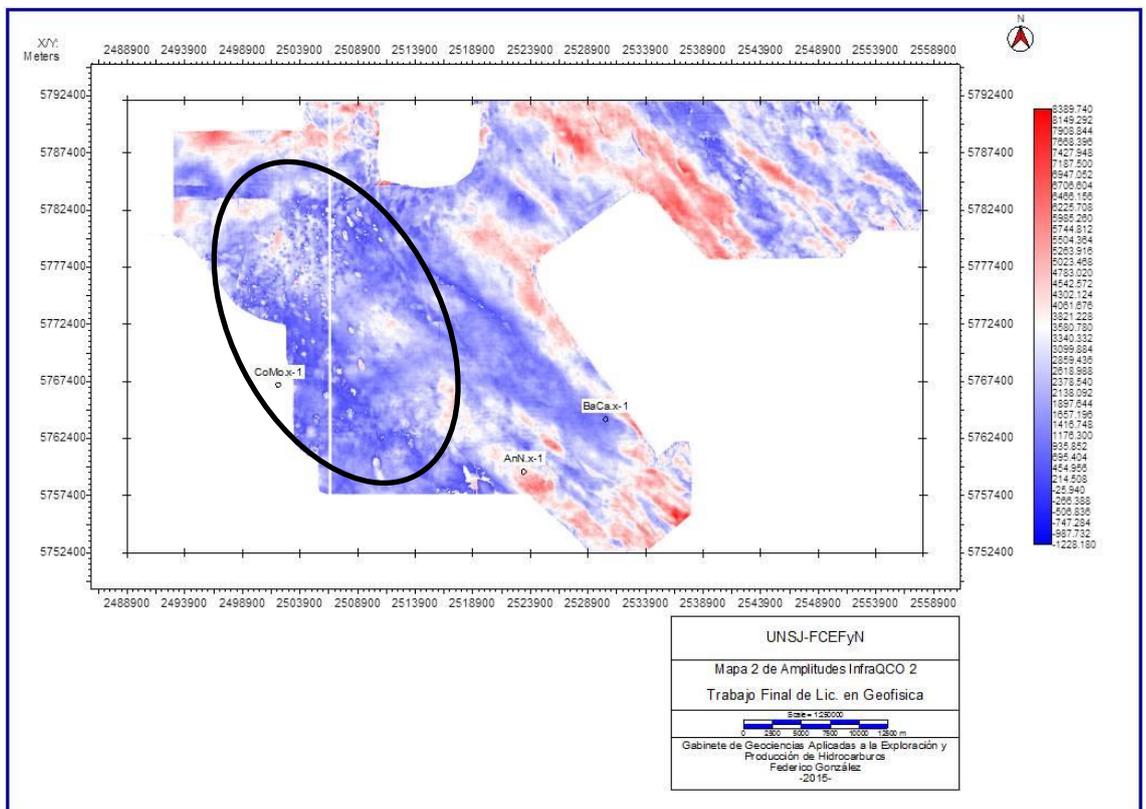


Figura 46: Mapa 2 de amplitudes de Intra QCO 2. Rodeados por una elipse aparecen los posibles abultamientos carbonáticos.

Por ultimo podemos mencionar que el horizonte va perdiendo amplitud hacia los bordes del sector donde pierde continuidad al NW (no interpretado, en blanco). Esto se debe a que la presencia del intrusivo lo atenúa paulatinamente.

### 5.3 Geoformas sigmoidales

En la parte centro-inferior del Intervalo Qco-Vaca Muerta es muy notoria la presencia de una serie de clinofomas progradantes sigmoidales. Las mismas se desarrollan enteramente por debajo de Intra QCO 2 y por encima de la base de Vaca Muerta (Fig. 47).

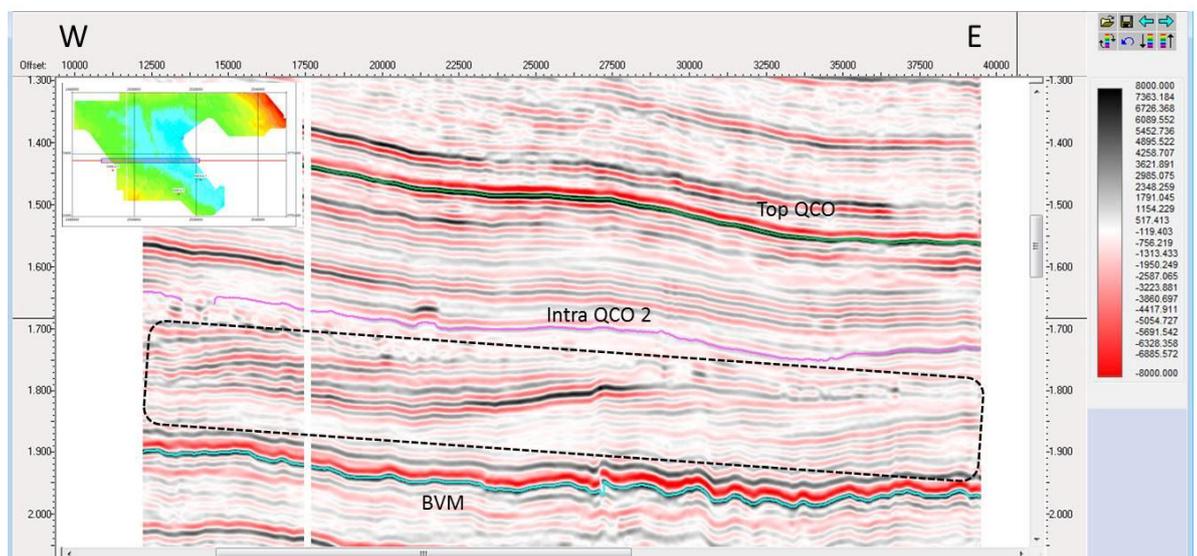


Figura 47: Crossline 5892 donde se observan las clinofomas (rodeadas por línea de puntos) dentro del Intervalo Quintuco-Vaca Muerta.

Para analizar un poco más estas unidades se aplanó el horizonte BVM y luego se efectuó un corte en tiempo (*“time slice”*) cortando las clinofomas (Fig.48). En el mismo se ve claramente que estas geoformas tienen un rumbo SW-NE.

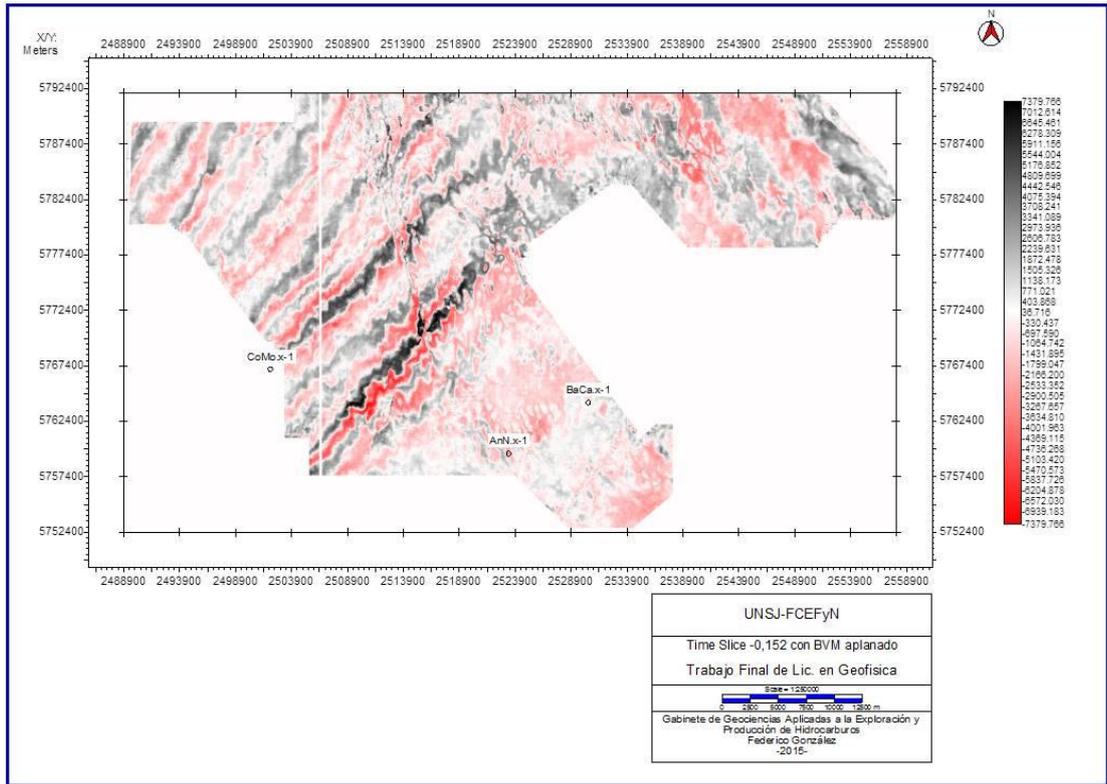


Figura 48: *Time slice* -0.152 con BVM aplanado.

Finalmente, para poder determinar la dirección de progradación se desplegó una línea sísmica arbitraria perpendicular al rumbo de los sigmoides (Fig.49). A partir de ella podemos concluir que estas clinoformas progradan desde el sureste hacia el noroeste. Esta observación concuerda con los trabajos previos publicados al respecto (Mitchum y Uliana, 1985).

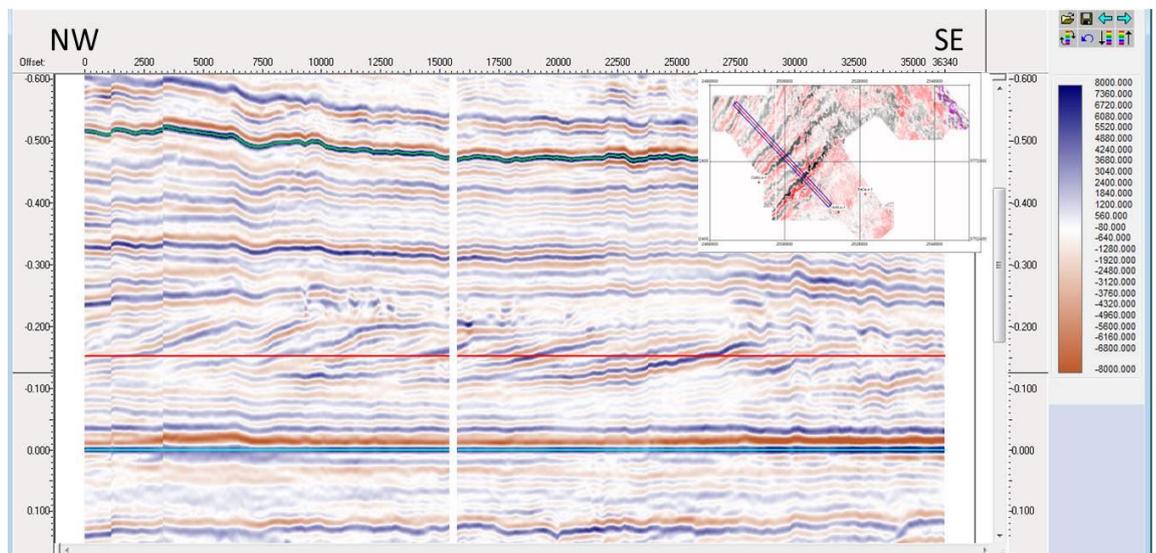


Figura 49: Línea sísmica arbitraria con BVM aplanado donde se ve claramente la dirección de progradación de las clinoformas sigmoidales. La línea roja horizontal corresponde al *time slice*.

## 6 ANÁLISIS SÍSMICO DEL CUERPO INTRUSIVO “LOMA DE LAS YEGUAS”

### 6.1 Antecedentes

A continuación se hará una descripción del Yacimiento Loma de Las Yeguas basada en los trabajos de Comeron *et al.* (2002) y González *et al.* (2005).

La acumulación de hidrocarburos en una intrusión hipoabisal, de tipo filoneana, en la Formación Quintuco-Vaca Muerta fue descubierta en 1985 por YPF, pero desde 1994 Total Austral S.A. es el operador.

El cuerpo intrusivo presenta una extensión aproximada de 20 km en sentido N-S y 10 km en sentido E-W, adopta una geometría tipo cuchara buzando suavemente hacia el norte en dirección al Volcán Auca Mahuida (su probable centro emisor). Presenta un espesor máximo de 40 metros, composición gábrica y una edad que varía entre 1,44 y 1,55 millones de años. El filón se intruye a una profundidad media de 2300 metros bajo boca de pozo (mbbp).

El mecanismo de drenaje de este yacimiento sería el de expansión del casquete de gas. La producción promedio de un pozo de Loma de Las Yeguas es de 270.000 m<sup>3</sup>/día de gas y 30 m<sup>3</sup>/día de petróleo.

El metamorfismo de contacto mejora la porosidad de la matrix en la zona afectada, generando un reservorio ubicado en el anillo de contacto que rodea al filón. Esta zona de contacto se ve además afectada por fracturación térmica y mecánica, relacionadas con la intrusión del cuerpo magmático, que contribuye a la mejora de las condiciones de reservorio.

De esta manera, el halo de metamorfismo superior UMZ (*Upper Metamorphic Zone*) y el inferior LMZ (*Lower Metamorphic Zone*) son los principales reservorios del yacimiento. El filón fracturado térmica y tectónicamente aporta parte de la producción pero es un reservorio secundario. Ver Figura 50.

La roca generadora es la Formación Vaca Muerta, que se encuentra actualmente en este yacimiento en generación tardía de petróleo. Cabe acotar que la intrusión de los cuerpos ígneos no genera una sobremaduración apreciable de la roca de caja y solo la afecta parcialmente en las inmediaciones de los filones.

La migración de hidrocarburos proviene directamente de la roca de caja. Esta última se encuentra sobrepresionada por efecto de la generación actual de hidrocarburos líquidos y gaseosos.

Una vez que se intruye el cuerpo magmático, el descenso de temperatura y la disipación de los fluidos asociados al magmatismo generan una disminución de volumen y la fracturación térmica. El diferencial de presión entre la roca de caja sobrepresionada y el filón enfriado, sería en parte, el motor eficaz de la migración de fluidos desde la roca de caja hacia el filón y su zona metamórfica.

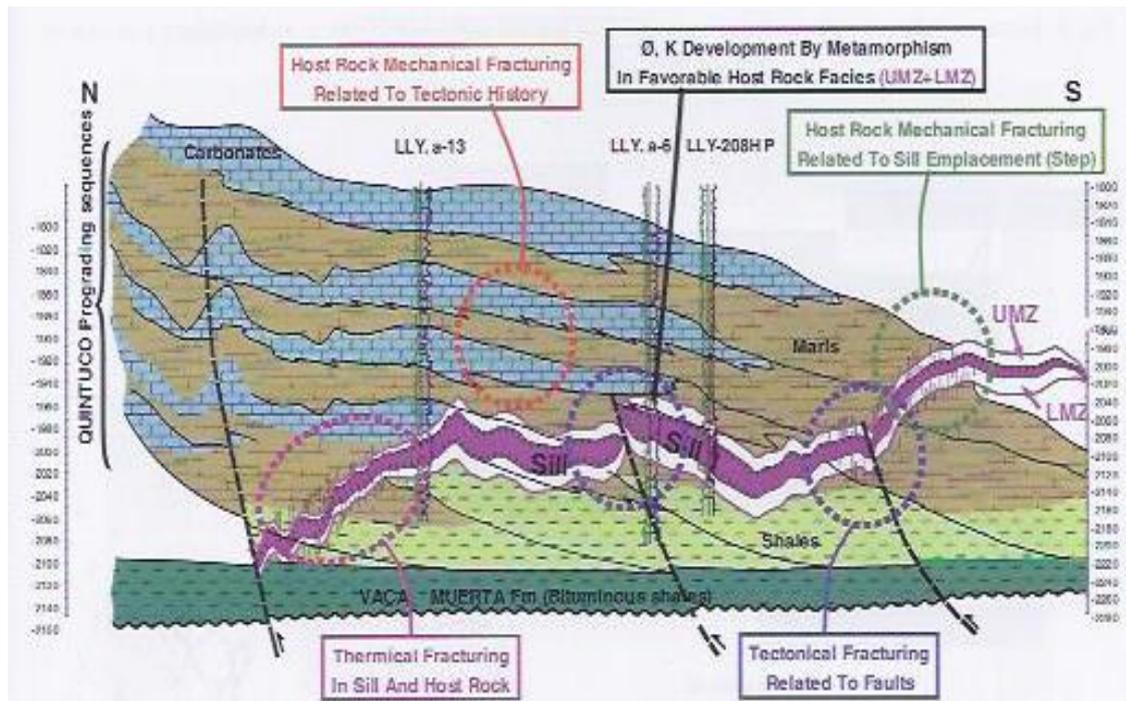


Figura 50: Disposición esquemática del filón y sus zonas metamórficas asociadas (Reproducido de González *et al.*, 2005).

En cuanto a la respuesta sísmica, el tope del filón es el evento más confiable y mejor calibrado. Esta signatura sísmica está caracterizada por una fuerte amplitud y está relacionada a un alto contraste de impedancia acústica entre el tope del filón y la roca de caja, a veces incrementado por el efecto de la interferencia (Figura 52).

La anomalía en amplitud de la signatura sísmica está controlada fundamentalmente por el espesor del filón, el efecto de interferencia y en menor grado por la litología de la roca de caja y los fluidos.

El mapeo estructural del tope del filón muestra una morfología compleja, que permite interpretar la dinámica de la intrusión (Figura 51). La propagación del cuerpo ígneo a través de la roca de caja, se efectuaría a través de las diferentes parasecuencias de

la Fm. Quintuco (Fig. 50) bifurcándose y adoptando una forma en planta de tipo "pata de pato", generando así compartimientos.

La estructura del filón desempeña un rol importante en la distribución de los fluidos, la cual debido a la presencia del reservorio en la zona metamórfica y de bancos duros los contactos varían de un sector a otro.

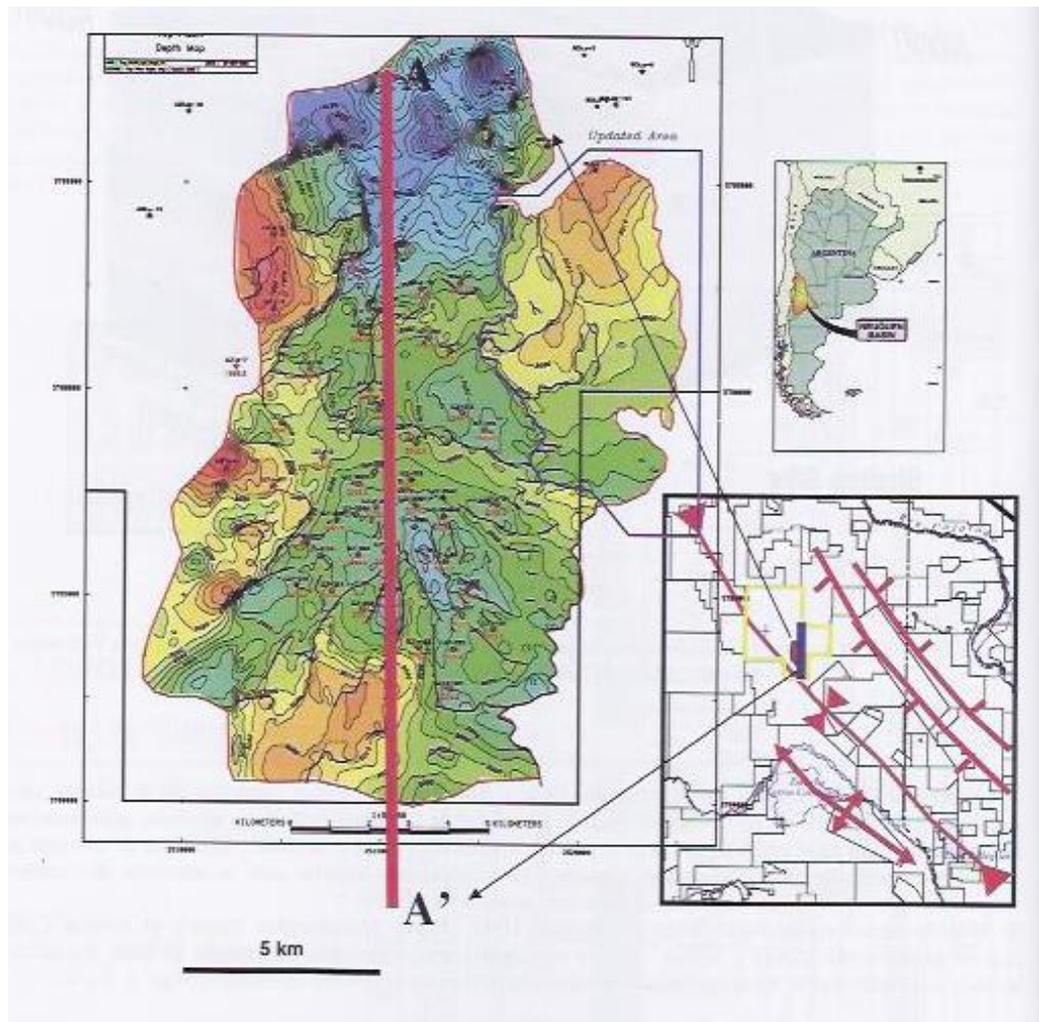


Figura 51: Mapa estructural al tope del filón del yacimiento Loma de Las Yeguas (Reproducido de González *et al.*, 2005).

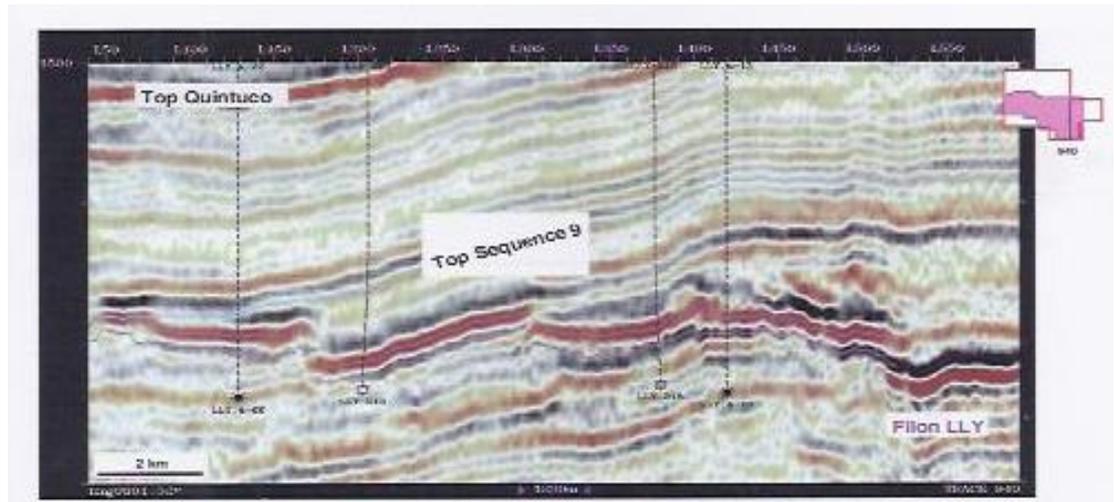


Figura 52: Sección sísmica A'-A que muestra el evento sísmico que produce el filón LLY (Reproducido de González *et al.*, 2005).

## 6.2 Descripción estructural

El evento sísmico correspondiente al cuerpo intrusivo Loma de Las Yeguas se identificó durante la interpretación del horizonte Intra QCO 2, tal y como se describió en el capítulo anterior. Una vez identificado, para poder estudiarlo con mayor énfasis se procedió a realizar una interpretación del mismo.

La señal producida por este intrusivo aparece en la sísmica como un conjunto de dos reflectores de diferente polaridad y de gran amplitud (Figuras 43, 44 y 52). Para interpretarlo se seleccionó el reflector de polaridad positiva (color negro) al cual se lo denominó LLY (Fig.53).

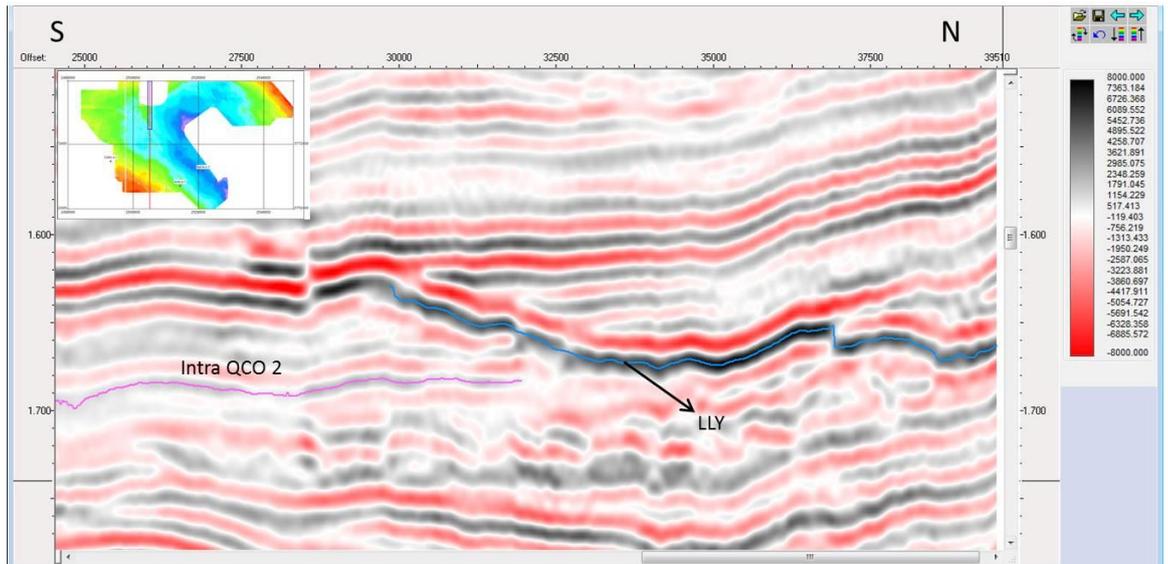


Figura 53: *Inline* 935 donde se observa el horizonte LLY interpretado. También se ve el horizonte Intra QCO 2 a partir del cual se identificó el filón.

Una vez realizada la interpretación y la posterior interpolación del horizonte se generó el mapa estructural del mismo (Figs. 54 y 55). En la Figura 54 se utiliza una escala menor para poder observar la ubicación relativa del filón dentro del cubo sísmico con el que se trabajó.

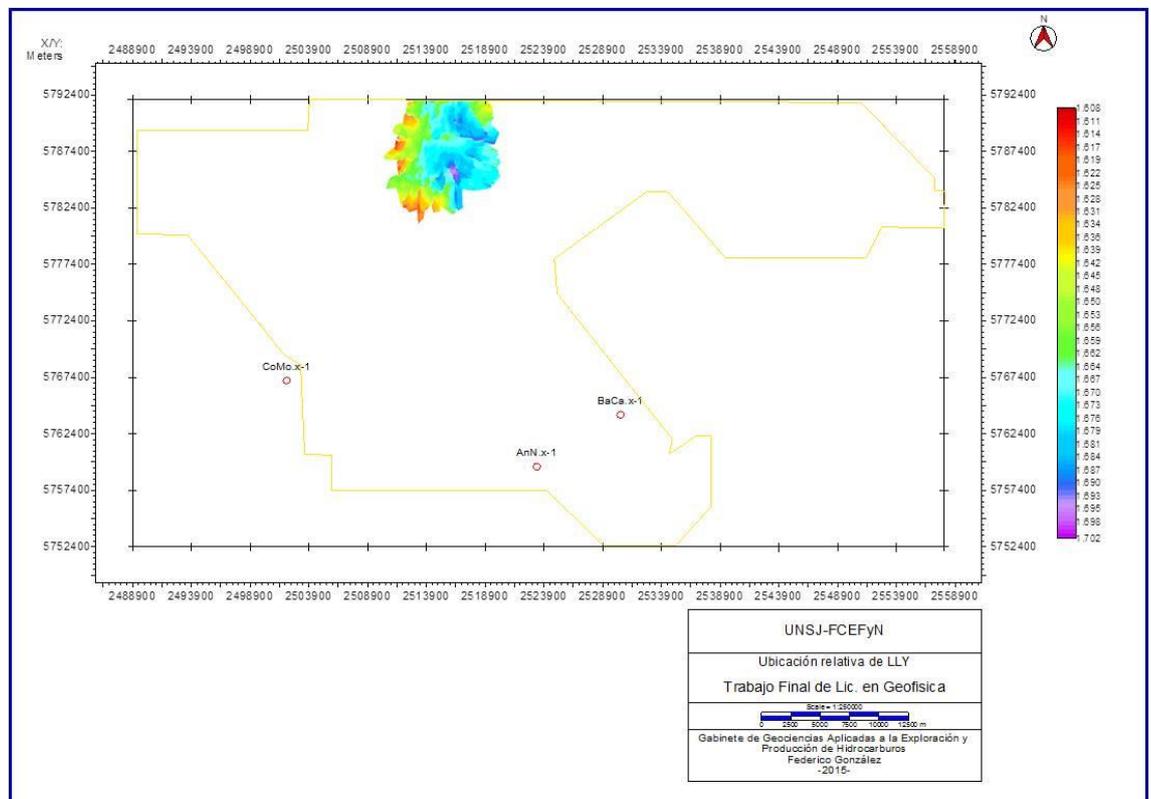


Figura 54: Ubicación del filón (mapa de colores) dentro del cubo sísmico (delimitado por línea amarilla).

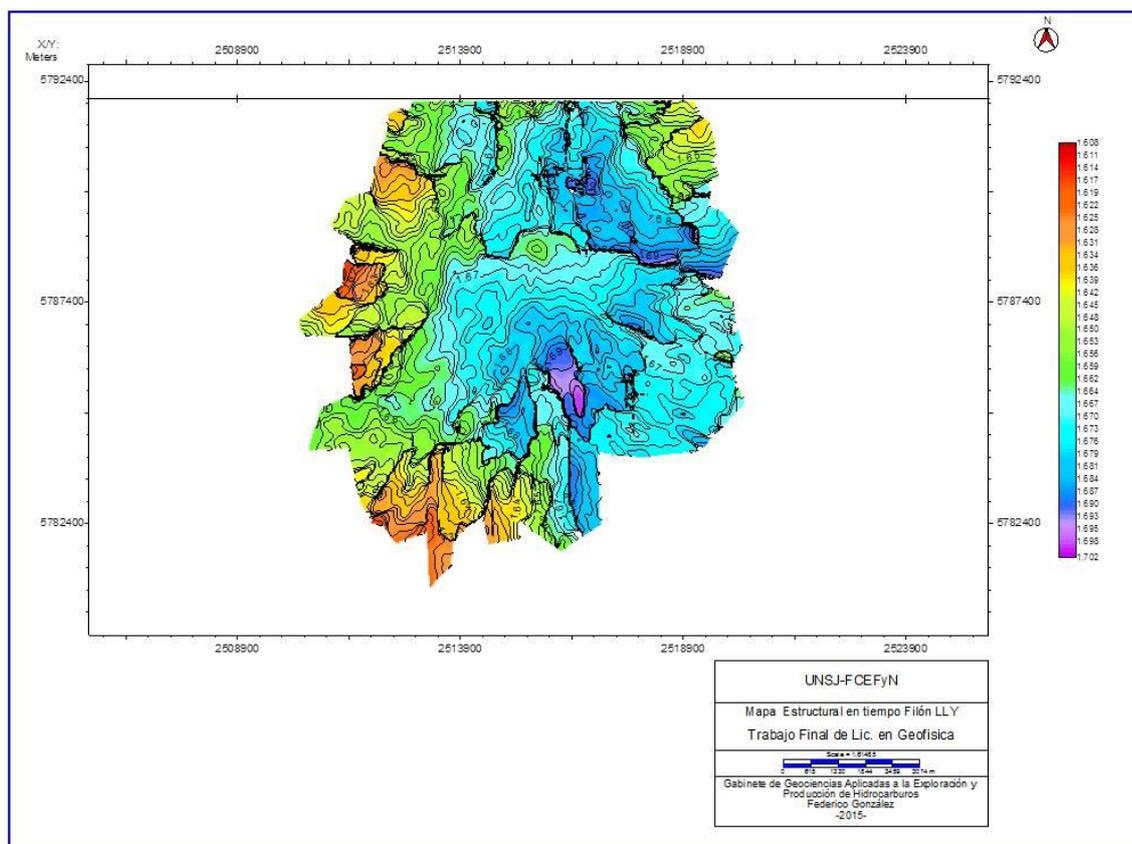


Figura 55: Mapa estructural en tiempo del filón Loma de Las Yeguas. Nótese la similitud con la mitad inferior del mapa mostrado en la Figura 51.

Es importante remarcar que durante este trabajo no se pudo mapear completamente el filón sino un sector del mismo, que correspondería a la mitad inferior del mapa que aparece en la Figura 51. Esto es porque la sísmica con la que se trabajó no lo ilumina completamente.

A partir del mapa estructural se puede inferir que el filón tiene una geometría en forma de “cuchara”, con la parte central más profunda y los bordes (sobre todo el borde occidental) más someros. Esto es consistente con lo publicado por Comeron *et al.* (2002) y González *et al.* (2005).

También se observan un gran número de discontinuidades, la mayoría de ellas de carácter radial. Las mismas se disponen entre los bordes del intrusivo y su interior, e incluso una de ellas lo atraviesa completamente en sentido este-oeste.

Todas las discontinuidades que afectan a este cuerpo magmático se distinguen claramente en el mapa de amplitudes mostrado en la Figura 56. Las mismas aparecen como una intrincada red de sectores de baja amplitud (tonos azules).

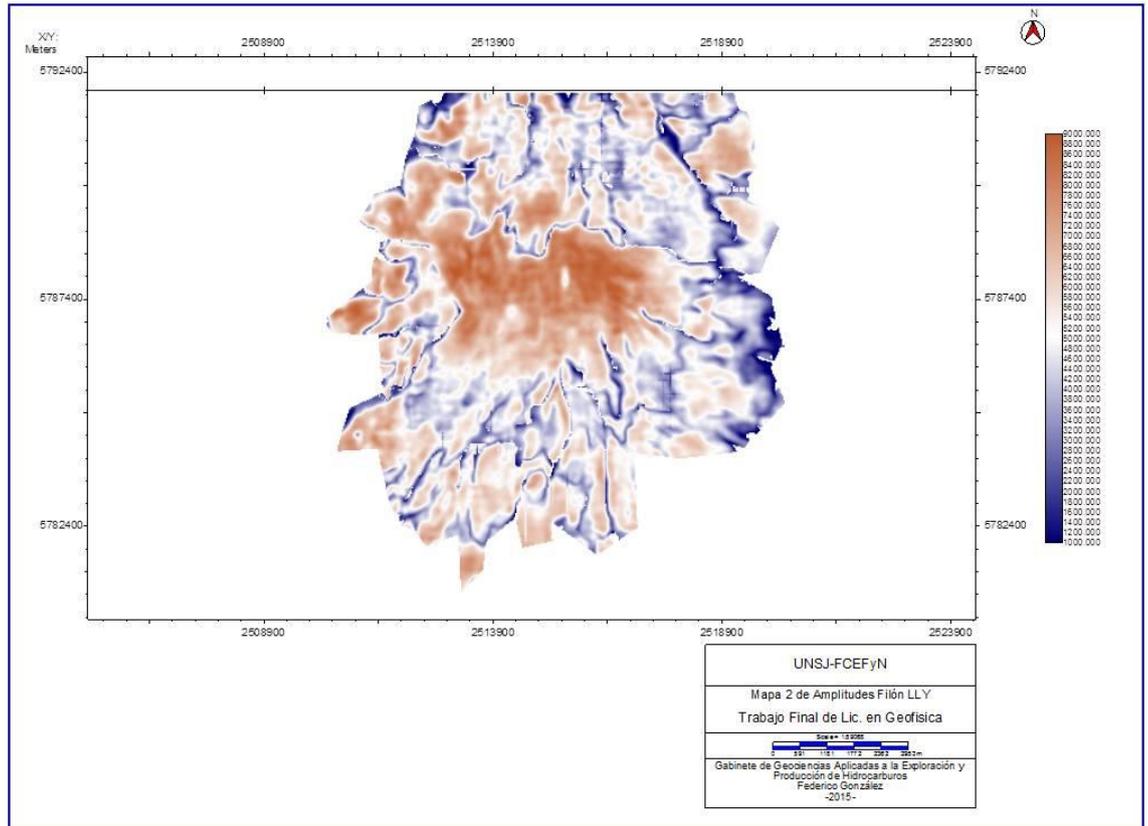


Figura 56: Mapa de amplitudes en tonos rojos y azules del filón LLY. Se observan con gran claridad las discontinuidades que afectan al intrusivo.

Según González *et al.* (2005) estas discontinuidades tienen dos orígenes diferentes (Fig.57). Algunas de ellas son fracturas de origen tectónico originadas por fallas posteriores al emplazamiento del filón. El resto son discontinuidades producidas debido a la bifurcación del cuerpo magmático durante su intrusión en las rocas del Intervalo Qco-Vaca Muerta, proceso denominado *fingering*.

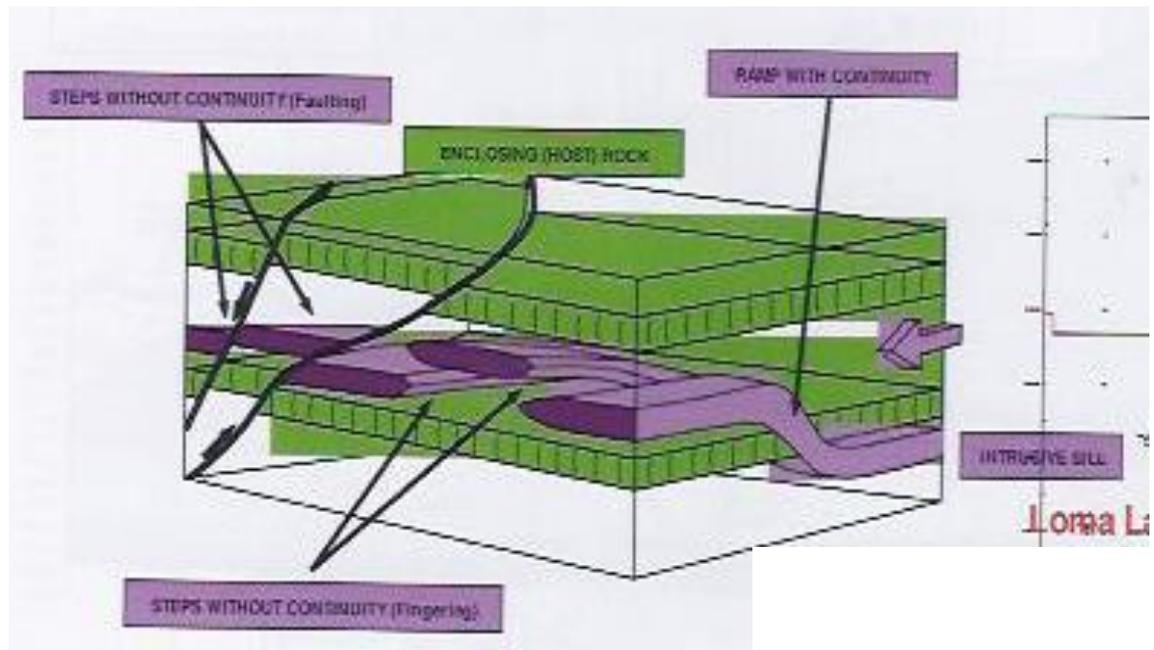


Figura 57: Esquema tridimensional que muestra el origen de las discontinuidades que afectan al filón Loma de Las Yeguas (Reproducido de González *et al.*, 2005).

Estas discontinuidades, sin importar su génesis, provocan que el filón Loma de Las Yeguas esté dislocado generando compartimientos. Por otra parte las mismas serían de gran importancia pues facilitarían la migración de los hidrocarburos desde la roca de caja hacia el interior del filón y hacia los halos metamórficos superior e inferior.

### 6.3 Análisis de la distribución de espesores

Dentro del análisis del intrusivo LLY se buscó determinar su espesor en tiempo y las variaciones del mismo.

Según Comeron *et al.* (2002) el espesor promedio del filón es de 25 metros, siendo el valor máximo de unos 40 metros y tendiendo a cero hacia los bordes del mismo.

Para analizar un poco la resolución sísmica vertical en el filón, se determinó la distancia (en tiempo sísmico de ida y vuelta *TWT*) entre los dos reflectores sucesivos provocados por la presencia de este cuerpo magmático (Fig. 58), es decir entre un pico y un valle. Esto dio un valor aproximado de 10 ms (es decir una longitud de onda de 20 ms). Tomando una velocidad promedio de 5500 m/s para una roca ígnea básica fracturada y considerando que la onda sísmica atraviesa dos veces la sección (*TWT*) se obtuvo un espesor para este evento equivalente a 27,5 metros. Con este análisis se pudo apreciar que el intrusivo queda contenido en menos de media

ondícula para los casos de espesor promedio (25 m) y hacia sus bordes donde el espesor tiende a cero. Por lo tanto no es posible resolver el techo y la base del filón, impidiendo la determinación del espesor mediante el mapeo de dichas superficies y la resta de ambas.

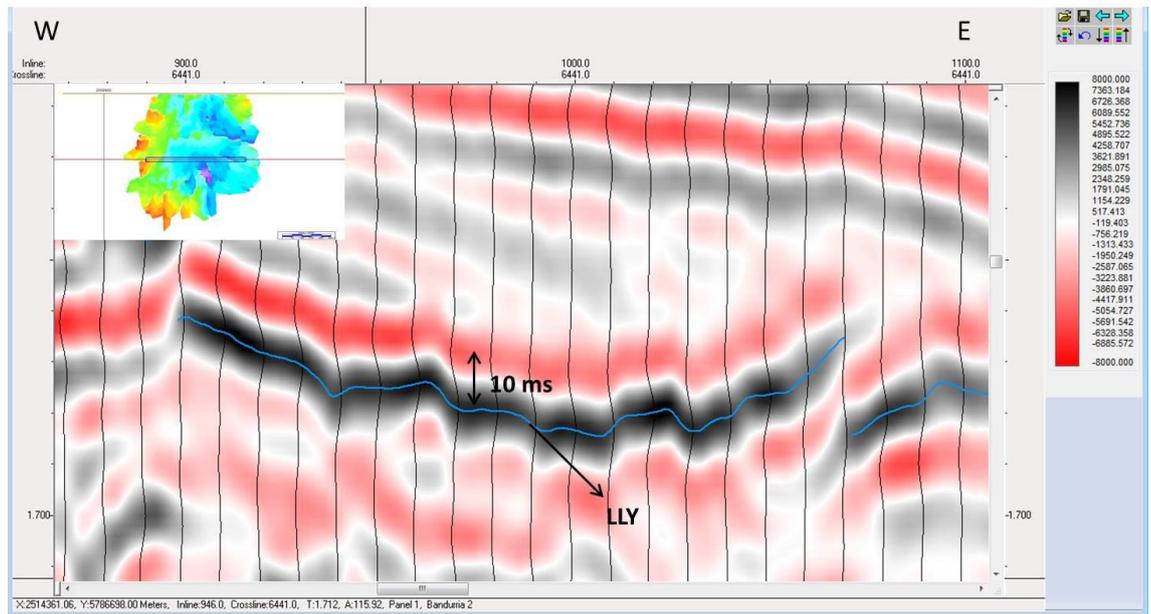


Figura 58: Crossline 6441 donde se observa la separación en tiempo sísmico  $TWT$  entre los dos reflectores asociados al filón.

Cuando el espesor de un reservorio se encuentra por debajo del límite resoluble de la sísmica, ocurre un fenómeno denominado Efecto “*Tuning*” (ver Apéndice). Como consecuencia de esto el espesor no puede determinarse a partir del tiempo  $TWT$  y se debe recurrir a otro método. Uno de ellos es utilizando la amplitud sísmica del reflector que abarca el techo y la base del cuerpo en cuestión. Si bien esto no se da en todos los casos, es frecuente que la amplitud del evento tenga una correlación aproximadamente lineal con el espesor del cuerpo que produce la reflexión. Si bien esto debe demostrarse relevando espesores medidos en pozos y verificando la amplitud en la traza sísmica más cercana al pozo, en el presente trabajo se utilizó para hacer una aproximación de modo cualitativo.

Tomando en cuenta lo anterior se generó un mapa de amplitudes de LLY (Fig. 59) con una escala de colores que resaltara bien las variaciones de amplitud que experimenta el horizonte.

En el mapa de la Figura 59 se denota claramente una anomalía de gran amplitud en el sector central del horizonte (colores brillantes). En tanto que hacia los bordes la

amplitud decrece paulatinamente (tonos rojizos y verdes), a excepción del borde occidental, donde el decrecimiento de la amplitud es muy pequeño.

De acuerdo a lo expuesto en el párrafo anterior y en el Apéndice podemos concluir que los sectores de mayor espesor del cuerpo intrusivo son el sector central y el borde occidental (es decir coincidente con los sectores que muestran las mayores amplitudes); mientras que hacia los demás bordes el espesor va disminuyendo gradualmente.

De esta manera vemos que el mapa de amplitudes juega un papel fundamental a la hora de estimar cualitativamente los espesores del filón y, consecuentemente, también de sus halos metamórficos superior e inferior. Esto es de enorme utilidad ya que al ser estas zonas los reservorios del yacimiento, estamos estimando también los sectores donde se esperan encontrar las mayores acumulaciones de hidrocarburos (las zonas de mayor espesor) y aquellos donde los volúmenes que se espera encontrar sean menores (las zonas de menor espesor).

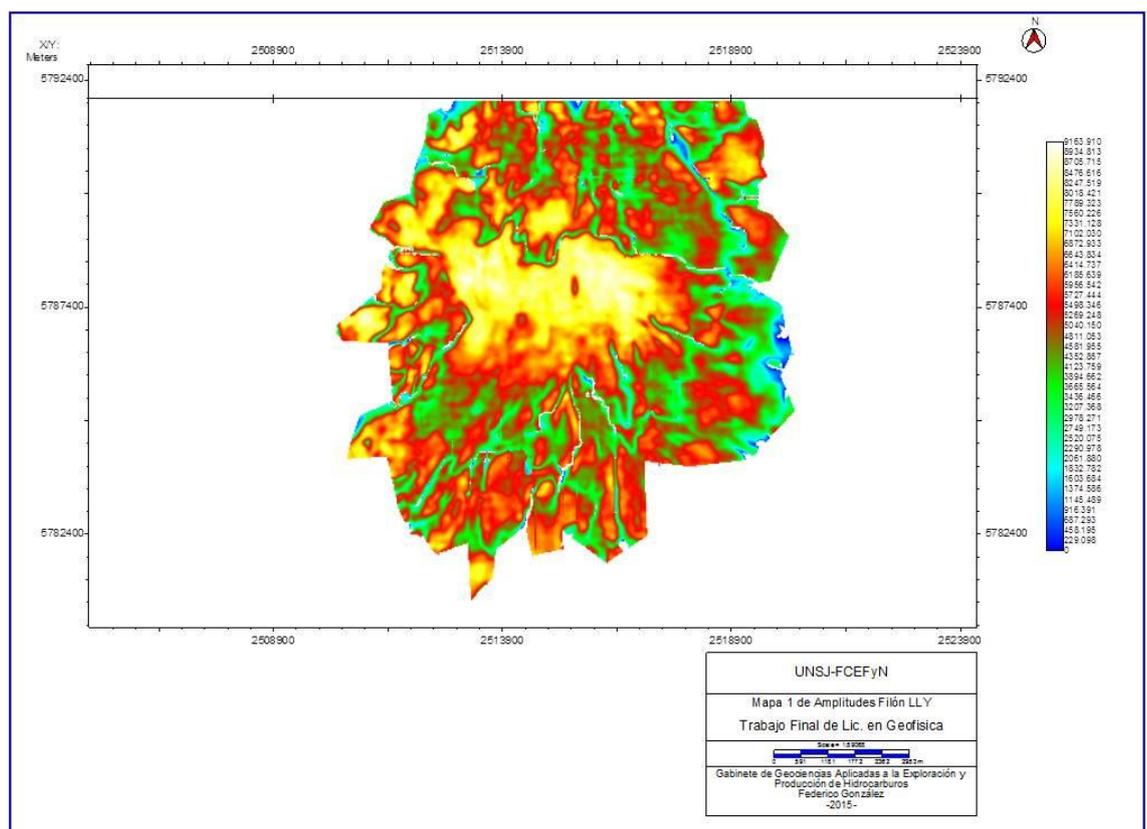


Figura 59: Mapa de amplitudes de LLY con una escala que muestra muy bien las variaciones. Nótese la anomalía de gran amplitud en el sector central del horizonte.

Para poder analizar las variaciones de amplitud, además del mapa anterior se desplegó una *crossline* en sentido oeste-este que atraviesa al filón en su parte

central (Fig.60). En la misma podemos ver que los sectores de mayor amplitud coinciden con los sectores donde el intrusivo es concordante con la estratigrafía; mientras que, por el contrario, las menores amplitudes se dan en aquellos sectores donde el filón es discordante (preferentemente en los extremos del mismo).

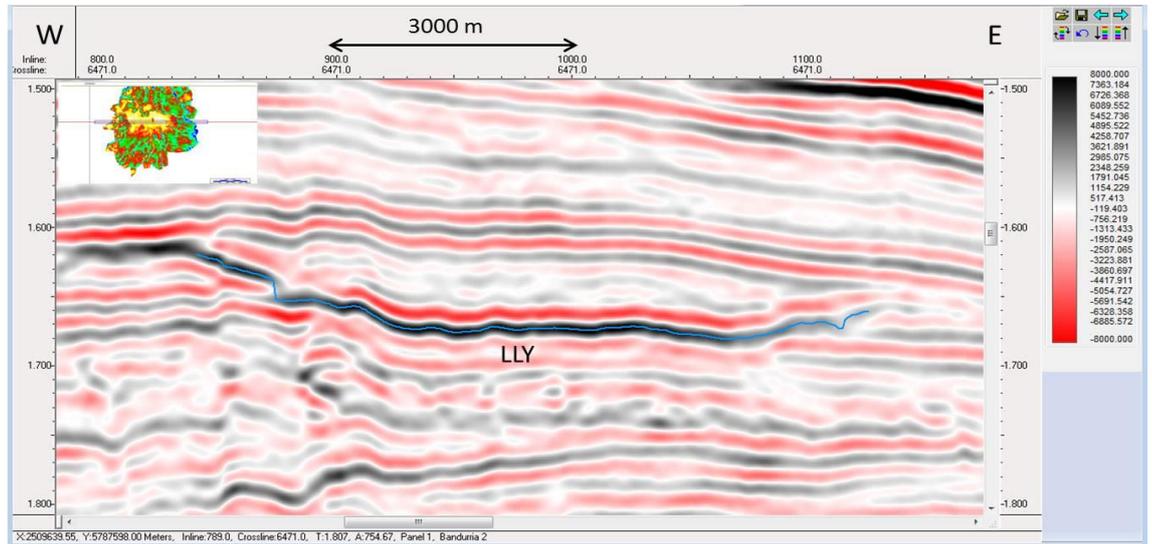


Figura 60: Crossline 6471 que corta al filón en su parte central.

Esto último coincide con el esquema de emplazamiento del filón mostrado en la Figura 50. En esta figura se observa que el filón se adelgaza en aquellos sectores donde tiene un comportamiento discordante respecto de los estratos que lo rodean.

## 7 CONCLUSIONES

Se realizó una interpretación sísmica basada en un cubo sísmico 3D de unos 1467 km<sup>2</sup> y la información de 3 pozos. Dada la gran extensión del dato sísmico y la escasa información de pozos, se realizó en primera instancia un mapeo general de horizontes claves que permitieron identificar grandes rasgos estructurales. Luego el foco del trabajo se puso en el sector norte del cubo, donde se detectó una anomalía sísmica de alta amplitud y carácter en parte discordante con la estratigrafía. Una vez finalizado el trabajo se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- ✓ A partir del mapeo general del cubo se observó que el Intervalo Quintuco-Vaca Muerta se encuentra afectado en su totalidad por el sinclinal regional del Bajo de Añelo. El eje de este pliegue se encuentra en el sector central del cubo sísmico y posee una dirección sureste-noroeste. Esto se evidenció claramente en los mapas estructurales de los horizontes claves interpretados.
- ✓ Desde el punto de vista tectónico, se detectaron fallas normales e inversas en la parte inferior del Intervalo Qco-Vaca Muerta. Las mismas afectan a la base de la Fm. Vaca Muerta en diferentes sectores y desaparecen gradualmente hacia la parte superior del Intervalo. Esto indica que algunas de estas fallas tuvieron su principal actividad antes de la depositación de las sedimentitas de la Fm. Quintuco.
- ✓ El Intervalo Qco-Vaca Muerta muestra un incremento del espesor desde el este-sureste hacia el oeste-noroeste, poniendo de manifiesto que el aporte de sedimentos y la generación de espacio de acomodación en la cuenca durante el Tithoniano-Valanginiano fue en esta dirección. Esto se verifica con el análisis de las cliniformas sigmoidales que se encuentran en la porción inferior del Intervalo, en donde se observa que la dirección de progradación de las mismas es en sentido sureste-noroeste.
- ✓ Luego de la lectura de los trabajos publicados sobre los yacimientos vecinos de Aguada San Roque y Loma de Las Yeguas (Comeron *et al.*, 2002 y González *et al.*, 2005) se pudo interpretar que el horizonte anómalo de gran amplitud detectado en el sector norte del cubo sísmico se trata de un cuerpo intrusivo de tipo filoneano (filón Loma de Las Yeguas), de edad Terciaria y de composición básica. Gracias a procesos de fracturación térmica y mecánica

dicho intrusivo constituye uno de los yacimientos de petróleo y gas más prolífico de la zona, en conjunto con el de Aguada San Roque.

- ✓ La gran amplitud sísmica del reflector LLY se interpretó que es originada principalmente por el fuerte contraste de impedancia acústica con la roca de caja. La velocidad sísmica de las rocas ígneas básicas oscila entre los 6000 y 7000 m/s (Kearey *et al.*, 2002), mientras que para las arcillas (principal roca de caja del yacimiento) es de aprox. 3000 m/s.
- ✓ El mapeo estructural del intrusivo mostró una geometría en forma de lopolito, es decir con el sector central más profundo y los bordes más someros.
- ✓ Se detectó también la presencia de una serie de fracturas/fallas mayormente radiales. Según González *et al.* (2005) se interpreta que esta fracturación se produjo por tectonismo y por un proceso denominado “*fingering*” durante el emplazamiento del filón. Las estructuras descritas permitieron la migración de hidrocarburos hacia el interior del filón y hacia sus halos metamórficos (reservorios del yacimiento Loma de Las Yeguas).
- ✓ Si bien no se contó con pozos dentro del set de datos que hubieran atravesado el filón (pozos LLY), se intentó aproximar de manera cualitativa un análisis de distribución de espesores. En base a publicaciones se relevó un espesor promedio de 25m (máximo 40m) para el cuerpo intrusivo. Considerando la longitud de onda  $\lambda$  mínima de 20 ms y  $\frac{1}{2}\lambda$  de 10 ms del dato se interpretó que los bordes del intrusivo no pueden ser resueltos sísmicamente y que por lo tanto el mismo se halla dentro de la ventana de “*Tuning*”. Sin embargo, en muchos de estos casos se puede aproximar el espesor en base a las amplitudes del reflector asociado. De acuerdo a esta premisa y al mapa de amplitudes sísmicas se concluyó que los máximos espesores estaban en la zona central del intrusivo, donde el mismo posee una geometría concordante respecto de la estratigrafía; mientras que las zonas más delgadas se visualizaron hacia los bordes, donde el filón manifiesta una disposición discordante. Esto concuerda con algunas observaciones descritas en el yacimiento Loma Las Yeguas (Comeron *et al.*, 2002 y González *et al.*, 2005).
- ✓ Las interpretaciones realizadas, más el complemento de la información de pozos de la región (no disponible para este estudio) pueden conformar una buena base para futuras exploraciones y para guiar el desarrollo de recursos hidrocarbúferos en la región.

## 8 APÉNDICE

### 8.1 Efecto “*Tuning*”

A continuación se hace un resumen del fenómeno de Efecto “*Tuning*” y de su implicancia en la estimación de espesores de capas delgadas en base a Hardage *et al.* (2009) y Yilmaz (2001).

Cuando tenemos un intervalo geológico de interés (por ejemplo un reservorio), y mediante el colgado de pozos hemos logrado identificar los reflectores correspondientes al techo y la base del mismo, entonces podemos estimar su espesor a partir de la diferencia de tiempo sísmico *TWT* entre ambos eventos. Luego, usando una ley de velocidades se puede convertir ese espesor en tiempo a un espesor en metros.

Sin embargo, cuando el techo y la base del intervalo están muy cercanos entre sí, los valores de espesores estimados se vuelven poco confiables debido a que las reflexiones provenientes de estas interfases interfieren constructiva o destructivamente. El tipo de interferencia va a depender de las diferencias de tiempo entre los arribos producidos por estos eventos, como así también de la polaridad de los mismos.

La variación en la forma de una ondícula sísmica de reflexión debido a la presencia de dos interfases reflectivas muy cercanas entre si se denomina Efecto “*Tuning*”.

Cuando los tiempos de reflexión se miden a lo largo de los picos, valles o cruces por cero de las trazas sísmicas, el Efecto “*Tuning*” dificulta la medición segura de los tiempos de arribo de los eventos individuales.

El intervalo de tiempo más delgado sobre el cual se puede realizar una estimación correcta de la distancia entre dos reflectores muy cercanos entre si se denomina *Tuning Thickness* (espesor de *Tuning*). Este espesor mínimo corresponde al límite de la resolución sísmica vertical propuesto por Widess (1973) de un cuarto de la longitud de onda.

A continuación se completa la descripción mediante un extracto de Bianco (2011).

Para analizar mejor las consecuencias del Efecto “*Tuning*” en la determinación de espesores sísmicos se propone un modelo de cuña (cuerpo que se adelgaza hacia los bordes hasta desaparecer). Este modelo es puramente cuantitativo y se hace para entender algunos conceptos importantes (Figura 61). En el mismo, el techo y la base de la cuña están dados por dos reflectores de diferente polaridad.

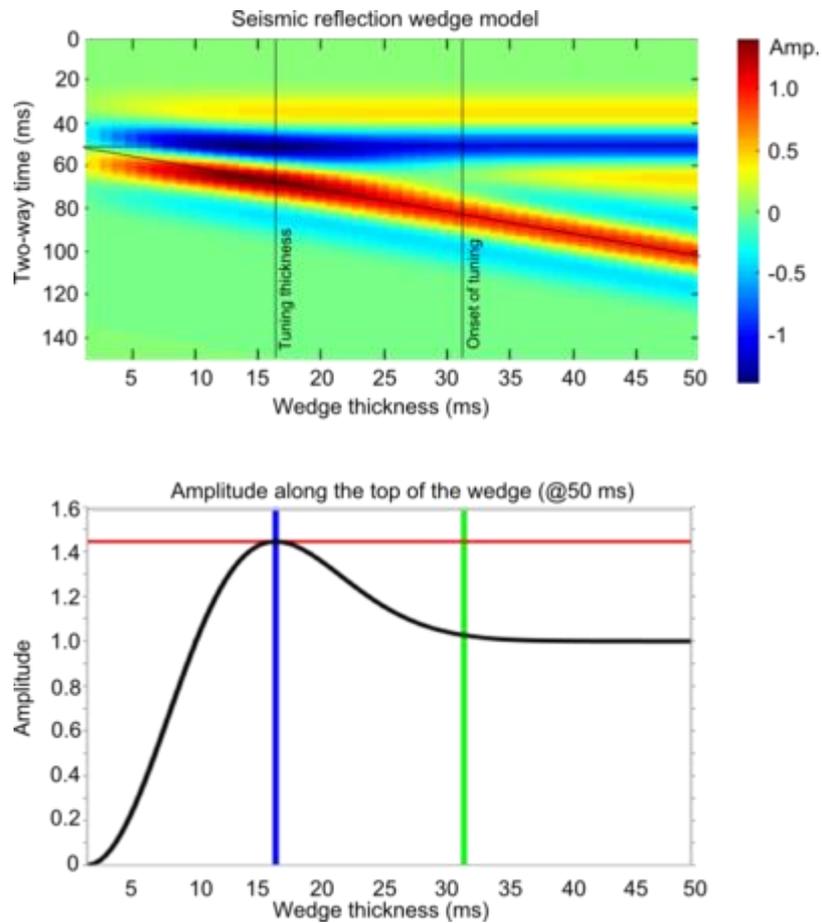


Figura 61: Modelo de cuña y su correspondiente curva de Tuning

La información más importante que podemos extraer de este modelo puede ser representada mediante una función llamada *Tuning Curve* (curva de Tuning) que se muestra debajo del modelo propuesto. En el modelo de la Figura 61 se utilizó una ondícula Ricker de 25 Hz de frecuencia. El Efecto “*Tuning*” se aprecia claramente como una variación en la forma, amplitud y tiempo de viaje a lo largo de los bordes de la cuña. La curva de Tuning muestra como varía la amplitud a lo largo del tope de la cuña. En ella podemos distinguir dos espesores de interés: el *onset of Tuning* que es el espesor por debajo del cual las ondas reflejadas en el tope y la base de la cuña comienzan a interferir; y el *Tuning Thickness*, cuyo significado se explicó más atrás. Lo importante es que la amplitud del evento sísmico del tope (y también de la base) de la cuña experimenta un máximo en el *Tuning Thickness*, y luego decae paulatinamente a medida que disminuye el espesor.

Por otra parte, en el modelo de la cuña se puede observar que cuando el espesor de la misma cae por debajo del espesor de Tuning los eventos del tope y la base se

mantienen paralelos, dando un espesor aparente constante y mayor al espesor real de la cuña.

De todo lo dicho anteriormente podemos concluir que si el espesor de nuestro intervalo de interés es mayor al espesor de Tuning entonces podemos determinar el mismo correctamente usando el tiempo  $TWT$ . Si por el contrario el espesor es menor al espesor de Tuning entonces debemos recurrir a otro método. Uno de ellos es usar una ley de amplitudes que relacione la amplitud del reflector con el tiempo sísmico. Para una ondícula Ricker, esta ley de amplitudes viene dada por:

$$A(t) = R(1 - (1 - 2\pi^2 f^2 t^2)e^{-\pi^2 f^2 t^2})$$

Donde  $R$  es el coeficiente de reflexión en el tope de la cuña,  $f$  es la frecuencia dominante de la onda y  $t$  es el espesor de la cuña (en segundos).

## 9 BIBLIOGRAFÍA

- Araniti, P. *“Interpretación de Sísmica 3D en la Cuenca Neuquina, área Las Tacanas, provincia de Neuquén, Argentina”*. Trabajo Final de Licenciatura en Geofísica. UNSJ, San Juan, Argentina. 2012. Inédito.
- Barredo, S.P. y Stinco, L.P. *Geodinámica de las cuencas sedimentarias: su importancia en la localización de sistemas petroleros en la Argentina*. Revista Petrotecnia, año 2010.
- Bianco, Evan (blog). *Tuning Geology*. Julio de 2011. Disponible en: <http://www.agilegeoscience.com/blog/2011/7/8/tuning-geology.html>
- Boll, A., Alonso, J., Fuentes, F., Vergara M., Laffitte, G. y Villar, H. *Factores controlantes de las acumulaciones de hidrocarburos en el Sector Norte de la Cuenca Neuquina, entre los ríos Diamante y Salado, provincia de Mendoza, Argentina*. IX Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos. 2014
- Comeron, R., González, J.M. y Schiuma, M. *Los reservorios de las rocas ígneas intrusivas*. V Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos. 2002.
- Dominguez, F., Paulin, S., Continanzia, M., Askenazi, A. y Seoane, F. *Estratigrafía del Intervalo Vaca Muerta-Quintuco en el sector central de la Cuenca Neuquina*. IX Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos. 2014.
- Gangui, A. y Grausem, M. *Tectonismo y estilos estructurales en el Engolfamiento Neuquino: implicancias en la interpretación de las fracturas monitoreadas por microsísmica en la Formación Vaca Muerta*. IX Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos. 2014.
- González, R., Achilli, F. y Chiappero, A. *Entrampamiento en rocas ígneas en el centro de la Cuenca Neuquina*. VI Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos. 2005.
- Hardage, B., Gwang, L., Keumsuk, L. y Han, K. *Tuning Effects' Impact on Seismic*. AAPG Publications. Octubre de 2009. Disponible en: <http://www.aapg.org/publications/news/explorer/column/articleid/724/tuning-effects%E2%80%99-impact-on-seismic>

- Herrera, Y., Cooper, N., Briceño, L. y Rey, A. *Manual para la adquisición y procesamiento de sísmica terrestre y su aplicación en Colombia*. Universidad Nacional de Colombia. 2010.
- Kearey, P., Brooks, M. y Hill, I. *An Introduction to Geophysical Exploration*. Ed. Blackwell Science Ltd, Oxford. 2002.
- Leanza, A., Sattler, F., Martínez, R. y Carbone, O. *La Formación Vaca Muerta y equivalentes (Jurásico Tardío-Cretácico Temprano) en la Cuenca Neuquina*. Relatorio del XVIII Congreso Geológico Argentino. Neuquén, 2011.
- Legarreta, L., y Villar, H. *Las facies generadoras de hidrocarburos de la Cuenca Neuquina*. Revista Petrotecnia, 14-42. Agosto de 2012.
- Maretto, H., Martinez Lampe, J., Rodríguez, L., Berdini, O., Schachner, G., Castellarini, P., Arregui, C., Quinteros, J., Martínez, E., Lasalle, D. y Pecuch, D. *Condiciones de entrapamiento en el sector sur del Engolfamiento Neuquino*. VI Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos. 2005.
- Martínez Corredor, R. *Análisis de la calidad de la imagen sísmica en atributos 3D, al aplicar una nueva definición de Binning en la migración Kirchhoff pre-apilado*. Tesis de magisterio en Ciencias de la Tierra, con énfasis en geofísica. Universidad EAFIT. 2011. Inédito.
- Mendiberri, H. y Carbone O. *Marco Geológico y Reseña Histórica de la Actividad Petrolera*. V Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos. 2002
- Mitchum, R. y Uliana, M. *Seismic Stratigraphy of Carbonate Depositional Sequences, Upper Jurassic - Lower Cretaceous, Neuquén Basin, Argentina*. Exxon Production Research Company, Texas. 1985.
- Olmos, M., Maretto, H., Lasalle, D., Carbone, O. y Naidés, C. *Los reservorios de la Formación Quintuco*. V Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos. 2002.
- Pángaro, F., Maretto, H. y Pianelli, L. *Abultamientos Carbonáticos de Plataforma en la Formación Quintuco en el Área de Rincón del Mangrullo, Cuenca Neuquina, Argentina. ¿Un nuevo objetivo exploratorio?* V Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos. 2002.
- Pángaro, F., Martínez, R., Sattler F. y Bettini, F. *El Bajo de Añelo*. Relatorio del XVIII Congreso Geológico Argentino. Neuquén, 2011.

- Tankard, A.J., Vergani, G.D. y Welsink, H.J. *Tectonic Evolution and Paleogeography of the Neuquén Basin, Argentina*. Petroleum Basins of South America. AAPG Memoir N°62, 1995.
- Tejada, S. *Introducción a la Interpretación Sísmica*. UNSJ. 2013.
- Varela, M. “*Interpretación Sísmica del Cretácico en el área Loma La Lata, Cuenca Neuquina, Provincia de Neuquén, Argentina*”. Trabajo Final de Licenciatura en Geofísica. UNSJ, San Juan, Argentina. 2013. Inédito.
- Yilmaz, Öz. *Seismic Data Analysis, Volume II*. Society of Exploration Geophysicists. 2001.