

Identificación y Delimitación de Recursos de Gas Mediante el Uso de Atributos Sísmicos en la  
Plataforma Continental de Australia

Mauricio Andrés Vasquez Pinto.

Trabajo de Grado para Optar el título de  
Magister en Geofísica.

Director:

Mario García González

Ph.D. en Geología

Universidad Industrial De Santander

Facultad De Ciencias

Escuela De Física

Maestría en Geofísica

Bucaramanga

2020

**Tabla de Contenido**

Introducción .....	8
1. Planteamiento del Problema.....	11
2. Hipótesis de Trabajo.....	14
3. Objetivos.....	16
4. Justificación del Proyecto.....	17
5. Marco de Referencia.....	18
5.1 Marco Geológico.....	18
5.2 Marco Teórico.....	24
5.2.1 Atributos sísmicos.....	24
5.2.2 Atributos Pre Apilado (Pre-stack).....	24
5.2.3 Atributos Post Apilado (Post-stack).....	25
5.2.4 Atributos Instantáneos.....	25
5.2.4.1 Magnitud de Reflexión .....	26
5.2.4.2 Fase Instantánea.....	27
5.2.4.3 Frecuencia Instantánea.....	29
5.2.5 Atributos Geométricos.....	31
5.2.5.1 Coherencia.....	31
5.2.6 Hidratos de metano.....	32
5.2.7 Modelamiento geoquímico 1D.....	35
5.2.8 Datos sísmicos.....	36
6. Resultados.....	37
7. Discusión de Resultados.....	79
8. Conclusiones.....	83
Referencias Bibliográficas .....	85

**Lista de Figuras**

Figura 1. Mapa de ubicación de la cuenca Browse..	13
Figura 2. Mapa de elementos tectónicos de la cuenca Browse	19
Figura 3. Línea sísmica regional de la Cuenca Browse	22
Figura 4. Columna estratigráfica generalizada de la Cuenca Browse.	24
Figura 5. Plot de magnitud de reflexión.	27
Figura 6. Imagen comparativa de una sección sísmica sin atributos (A) y otra con el atributo de fase instantánea (B).	28
Figura 7. Plot de frecuencia instantánea.	30
Figura 8. Cubo sísmico en coherencia.	32
Figura 9. Diagrama esquemático de la zona de estabilidad de los hidratos de gas (GHSZ) en sedimentos marinos..	33
Figura 10. Bloque Poseidón 3D con los pozos con información disponible en la costa NW de Australia..	40
Figura 11. Imagen de planta de las inlines y xlines trabajados para el bloque Poseidon 3D.	41
Figura 12. Inline 2411 en dirección NW-SE sin atributos.	42
Figura 13. Inline 2411 en dirección NW-SE interpretada	44
Figura 14. Inline 2411 en sentido NW-SE bajo el atributo de Coherencia.	46
Figura 15. Inline 2411 en dirección NW-SE abjo el atributo de Frecuencia Instantanea	48
Figura 16. Inline 2411 bajo el atributo de Energía de reflexión.	49
Figura 17. Inline 2851 en dirección NW-SE sin atributos.	51
Figura 18. Inline 2851 en dirección NW-SE interpretada	53
Figura 19. Inline 2851 en sentido NW-SE bajo el atributo de Coherencia	55

Figura 20. Inline 2851 en dirección NW-SE bajo el atributo de Frecuencia Instantanea.	57
Figura 21. Inline 2851 bajo el atributo de Energía de reflexión	59
Figura 22. Time slice con z=1300ms sin atributos.	61
Figura 23. Time slice con z=1300ms bajo el atributo de Coherencia	62
Figura 24. Time slice con z=1300ms bajo el atributo de Frecuencia Instantánea	64
Figura 25. Time slice con z=710ms bajo el atributo de Energía de reflexión.	66
Figura 26. Ubicación de los pozos del bloque Poseidon 3D utilizados para realizar la cross section SW-NE	67
Figura 27. Cross section realizada con los pozos Poseidon-2, Boreas-1 y Poseidon-1.	69
Figura 28. Historia de subsidencia de la zona de estudio con datos del pozo Poseidon-1.	70
Figura 29. Historia de subsidencia de la zona de estudio con el modelo de madurez termal.	71
Figura 30. Modelo de temperatura de la zona de estudio	72
Figura 31. Modelo de presión litostatica (línea verde), hidrostatica (línea azul) y presión de poro (línea negra) de la zona de estudio..	73
Figura 32. Mapa de temperaturas del océano a 550m de profundidad.	75
Figura 33. Diagrama de gradiente geotérmico para la zona de estudio tomado del pozo Poseidon-2.	76
Figura 34. Curva de equilibrio de fase de los hidratos de metano para la zona de estudio.	77

**Lista de Apéndices**

Apéndice A. Xline 2277 sin atributos sismicos .....	90
Apéndice B. Xline 2277 bajo el atributo de Coherencia.....	91
Apéndice C. Xline 2277 bajo el atributo de Frecuencia Instantanea. ....	93
Apéndice D. Xline 2277 bajo el atributo de Energia de reflexion .....	95
Apéndice E. Xline 2675 sin atributos sismicos.....	97
Apéndice F. Xline 2675 bajo el atributo de Coherencia .....	98
Apéndice G. Xline 2675 bajo el atributo de Frecuencia Instantanea.....	100
Apéndice H. Xline 2675 bajo el atributo de Energia de reflexion .....	102
Apéndice I. Mapa de ubicación del loop sismico .....	103
Apéndice J. Loop Sismico .....	104

## Resumen

**Título:** Identificación y delimitación de recursos de gas mediante el uso de atributos sísmicos en la plataforma continental de Australia\*

**Autor:** Mauricio Andrés Vasquez Pinto\*\*

**Palabras claves:** Atributos sísmicos, frecuencia instantánea, hidratos de metano, modelamiento geoquímico 1D, cuenca Browse, bloque Poseidón 3D.

### Descripción:

El uso de atributos sísmicos es ampliamente utilizado en la industria energética al momento de identificar yacimientos convencionales de gas, puesto que la respuesta acústica de las saturaciones de este hidrocarburo es de fácil observación en adquisiciones sísmicas de alta calidad. Atributos como la frecuencia instantánea y el análisis de descomposición espectral se usan para identificar lo que se denominan “*Bright Spots*” que son sencillamente áreas donde existe un fuerte contraste de la velocidad de la onda en el contacto entre una roca saturada en gas con las rocas no saturadas. Dentro de los yacimientos de gas no convencionales se encuentran los yacimientos de hidratos de gas metano, también conocidos como clatratos de metano, que consisten en una estructura cristalina similar al hielo en la cual se encuentran una alta proporción de moléculas de metano (CH<sub>4</sub>). El gas más común en los hidratos de gas es el metano (>99.9%), y en algunos yacimientos se encuentran en menor cantidad otros gases como el etano, propano y dióxido de carbono Chong *et al.*, (2015).

En este estudio se aplicaron atributos sísmicos geométricos e instantáneos, modelamiento geoquímico 1D y análisis petrofísicos para analizar el bloque Poseidón 3D, al noroeste de Australia, en donde se identificó la presencia de gas en yacimientos convencionales asociados a la Formación Plover a 5 km de profundidad, y también en yacimientos no convencionales asociados a hidratos de gas a 0.5 km de profundidad.

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ciencias. Escuela de Física. Director: Mario García González. Ph.D en Geología.

## Abstract

**Title:** Identification and delimitation of gas resources using seismic attributes in the continental platform of Australia\*

**Author:** Mauricio Andrés Vasquez Pinto\*\*

**Key words:** Seismic attributes, instantaneous frequency, methane hydrates, 1D geochemical modeling, Browse basin, Poseidon 3D block.

### Description:

The use of seismic attributes is widely used in the energy industry to identify conventional gas reservoirs due to the acoustic response of gas saturations in high resolution seismic information. Attributes such as instantaneous frequency and spectral decomposition are used to identify “*Bright spots*” which are areas where a strong contrast in the wave velocity between saturated and non-saturated rocks can be observed.

For unconventional gas reservoirs we find methane hydrates reservoirs, also known as methane clathrates, which consist of a crystalline structure similar to ice with a high concentration of methane (CH<sub>4</sub>). The most common gas present in hydrates is methane (>99.9%), and in some cases there are trace quantities of other gases such as ethane, propane and carbon dioxide Chong *et al.*, (2015).

For this study the application of geometrical and instantaneous seismic attributes, 1D geochemical modeling and petrophysical analysis were used in the Poseidon 3D block, northeast Australia, where conventional gas reservoirs associated with the Plover Formation were identified at a depth of 5 Km and also unconventional gas reservoirs associated to methane hydrates were identified at a depth of 0.5 Km.

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ciencias. Escuela de Física. Director: Mario García González. Ph.D in Geology

## Introducción

El uso de atributos sísmicos para la identificación de yacimientos de gas convencional y no convencional es una herramienta muy útil, donde mediante el análisis de las trazas sísmicas se puede medir la información de la amplitud y la fase, la información de la amplitud se relaciona con la intensidad del reflector y la información de la fase es la base para la medida de la frecuencia instantánea.

El uso de atributos sísmicos es ampliamente utilizado en la industria energética al momento de identificar yacimientos convencionales de gas puesto que la respuesta acústica de las saturaciones de este hidrocarburo es de fácil observación en adquisiciones sísmicas de alta calidad. Atributos como la frecuencia instantánea y análisis de descomposición espectral se usan para identificar lo que se denominan “*Bright Spots*” que son sencillamente áreas donde existe un fuerte contraste de la velocidad de la onda en el contacto entre una roca saturada en gas con las rocas no saturadas.

Dentro de los yacimientos de gas no convencionales se encuentran los yacimientos de hidratos de gas metano, también conocidos como clatratos de metano, con fórmulas químicas ( $\text{CH}_4 \cdot 5.75\text{H}_2\text{O}$ ) o ( $4\text{CH}_4 \cdot 23\text{H}_2\text{O}$ ) que consisten en una estructura cristalina similar al hielo en la cual se encuentran una alta proporción de moléculas de metano ( $\text{CH}_4$ ) como lo indican las fórmulas anteriormente incluidas. Estas estructuras cristalinas presentan sistemas cúbicos o hexagonales dependiendo del tipo de gas (Kvenvolden, 1988 y Chong. Z.R, *et al.*, 2015). El gas más común en los hidratos de gas es el metano (>99.9%), y en algunos yacimientos se encuentran en menor cantidad otros gases como el etano, propano y dióxido de carbono (Kvenvolden y McMenamin, 1980).

La importancia del estudio de los hidratos de metano ha aumentado en años recientes debido a su enorme potencial como recurso energético, y como un factor importante en el secuestro de CH<sub>4</sub> en el fondo marino, los cuales contribuyen a disminuir la presencia de metano en la atmosfera, por consecuente la formación o destrucción de los hidratos de gas está ligado al cambio climático. Los hidratos de gas son estables en condiciones de alta presión y bajas temperaturas, condiciones que se encuentran en regiones de permafrost y en la plataforma continental de márgenes convergentes y divergentes (Satyavani et al. 2008). La detección de estos hidratos se realiza mediante la identificación de un reflector sísmico anómalo conocido como el “*Bottom-simulating reflector*” o BSR. Un BSR típico exhibe características muy similares al fondo marino, pero con una polaridad inversa comparado con el reflector del fondo marino. El BSR está asociado con la base de la zona de estabilidad del hidrato de gas, denominada por las siglas en ingles GHSZ (Gas Hydrate Stable Zone) (Satyavani *et al.*, 2008). El BSR puede cortar los horizontes o reflectores de estratos sedimentarios. El BSR ocurre debido a un fuerte contraste de impedancia acústica entre los sedimentos saturados de gas y la capa solida de hidratos de metano suprayacente, la intensidad de este reflector es muy sensible a la concentración del gas presente en los espacios de poro (Holbrook et al. 1996).

El procedimiento matemático que lleva a la separación de los datos de reflexión sísmica en componentes como energía, frecuencia y fase son explicados por Taner *et al.*, (1979). Estos atributos; la intensidad de reflexión, la fase y la frecuencia instantáneas, caracterizan los componentes de la onda sísmica. Separar las ondas sísmicas en estos componentes permite al interprete discriminar y caracterizar de una mejor forma los eventos de reflexión sísmica (Partyka 1998, Taner y Sheriff 1977).

En este estudio se aplicaron atributos sísmicos, geométricos e instantáneos, para analizar el bloque, al noroeste de Australia, denominado Poseidon 3D, en donde se identificó la presencia de gas en yacimientos convencionales asociados a la Formación Plover a 5 km de profundidad, y también en yacimientos no convencionales asociados a hidratos de gas a 0.5 km de profundidad.

## 1. Planteamiento del Problema.

En la cuenca Browse situada en la plataforma continental del *offshore* australiano se reporta la presencia de recursos de hidrocarburos entre los cuales se encuentran acumulaciones en yacimientos convencionales de gas y petróleo y yacimientos no convencionales entre los cuales se destacan los hidratos de gas y el *shale gas*. Este trabajo de investigación se centra en la identificación de los hidratos de gas en la zona y su papel como un posible sello que permite la acumulación del recurso hidrocarburífero y su posible relación con las acumulaciones de gas reportadas en las formaciones del Jurásico. El rol de los hidratos de metano como sello para acumulación de gas libre ha sido descrito por Skorobogatov *et al.*, (1998) y Collett *et al.*, (2011).

El uso de atributos sísmicos para la identificación de zonas saturadas con gas también se puede utilizar para los reservorios convencionales y otros no convencionales como arenas apretadas y *shale gas*, ya que la respuesta sísmica es similar debido fenómeno de atenuación de la amplitud de onda en medios gaseosos. En este estudio se trabajó el bloque Poseidón 3D en el *offshore* de Australia, el bloque se encuentra geológicamente ubicado en la cuenca Browse con 140.000 Km<sup>2</sup> de extensión ubicada al Noroeste de Australia. (Figura 1).

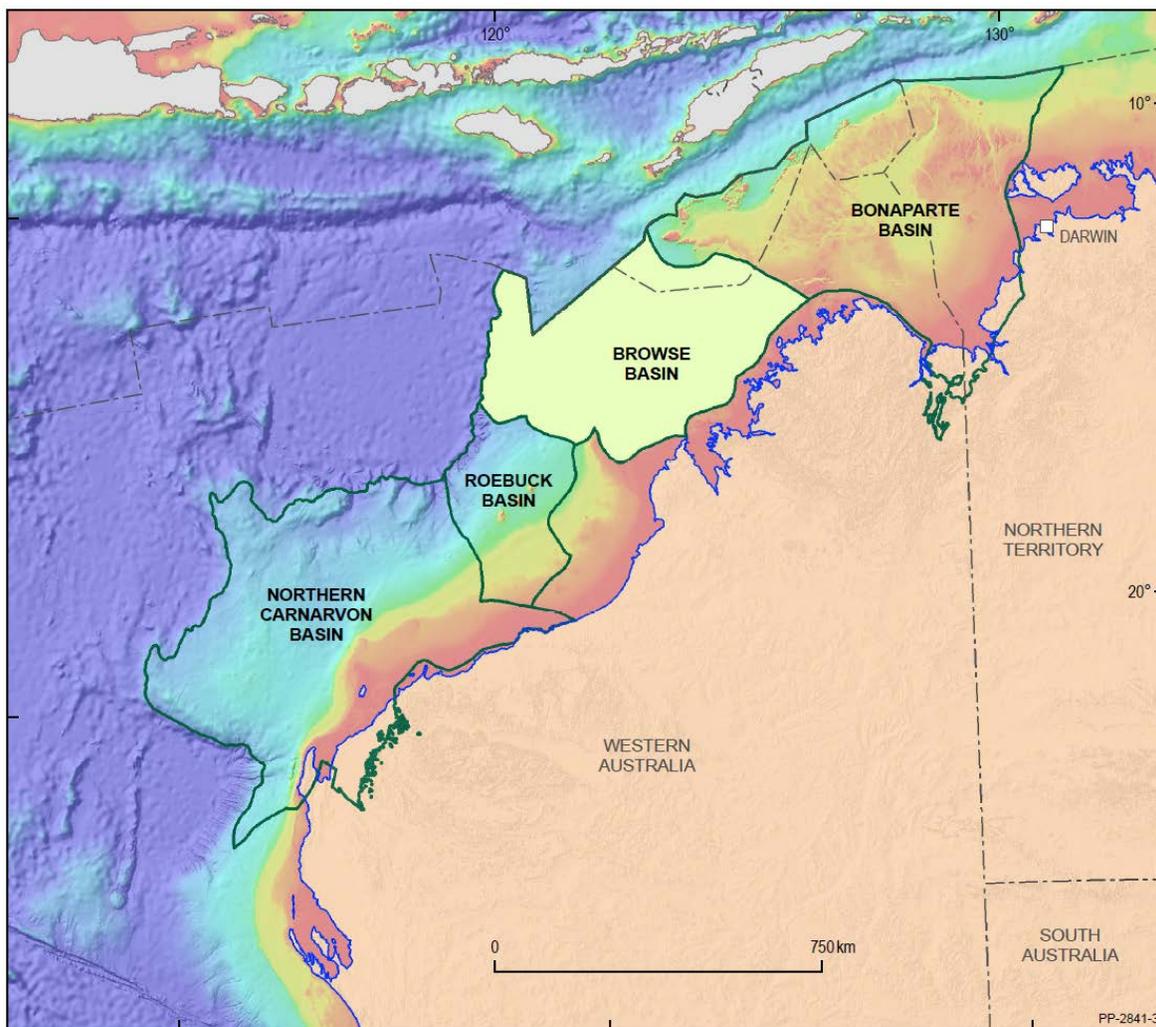
Los reservorios de gas en hidratos de metano se identifican principalmente por medio del delineamiento del reflector BSR en una sección sísmica, en algunos lugares alrededor del mundo el BSR no puede ser observado a pesar de existir hidratos de gas los cuales se evidencian en perforaciones, este fenómeno se puede atribuir a la poca o nula cementación de los sedimentos en donde se encuentran los hidratos en secciones sedimentarias heterogéneas (Holbrook *et al.* 1996; Wood y Ruppel 2000; Ashi *et al.* 2002). Por esta razón es de suma importancia el uso de herramientas como los atributos sísmicos de frecuencia instantánea,

coherencia y energía que permitan la identificación y la detección de los hidratos de gas. La presencia de hidratos de gas y gas libre en otros reservorios no convencionales se puede deducir observando evidencias adicionales como el “blanqueamiento” acústico, reflexiones mejoradas y la frecuencia instantánea en secciones sísmicas. De la misma manera la amplitud sísmica versus el offset (AVO) es de gran utilidad para la determinación de presencia de gas libre. Este estudio tiene como foco el análisis de los atributos sísmicos que permitan una mejor identificación y detección no solo del BSR sino también de reservorios de saturados con gas en la zona de interés.

La problemática base para este estudio radica en la dificultad de visualizar la presencia de yacimientos de gas en imágenes sísmicas sin el tratamiento por atributos. Posteriormente por medio de estos poder identificar e individualizar estos yacimientos en sus categorías de convencionales y no convencionales.

Figura 1.

Mapa de ubicación de la cuenca Browse.



Nota: Tomado de Regional Geology of the Browse Basin. Geoscience Australia.

## 2. Hipótesis de Trabajo.

En la cuenca Browse se han identificado yacimientos de gas convencional en la Formación Plover, de edad Cretácea, a una profundidad aproximada de 5000 metros, así mismo en el presente trabajo se identificó la presencia del reflector BSR a profundidades someras menores a 500 metros indicando la presencia de hidratos de gas. Dada la cercanía y ocurrencia de estos dos tipos de yacimientos de gas, en el presente trabajo se planteó la hipótesis de la existencia de una relación directa entre estos dos yacimientos, en donde los gases termogénicos de la Formación Plover migran a través de fallas hacia la superficie marina formando hidratos de metano a profundidades someras con respecto al fondo marino.

Para probar esta hipótesis de trabajo se requieren identificar los siguientes elementos del sistema: 1) identificación, mediante atributos sísmicos, de la presencia de yacimientos de gas profundo en la Formación Plover; 2) Identificación de fallas que sirven como vías de migración del gas de una formación profunda hacia la sección sedimentaria situada a profundidades someras; 3) Modelamiento geoquímico del sistema petrolífero que involucre las condiciones de presión y temperatura del yacimientos profundo de gas termogénico y el yacimiento de hidratos de metano en la sección somera. 4) Análisis de las condiciones de estabilidad de los hidratos de gas en el área de estudio. Con los anteriores elementos se puede argumentar la presencia de la relación entre los dos yacimientos y la ocurrencia de hidratos de metano.

La comprobación de la relación directa entre los hidratos de metano a profundidades someras, y los yacimientos de gas profundo permitiría establecer un nuevo concepto exploratorio para la localización de yacimientos convencionales de hidrocarburos. En efecto en la región de norte del golfo de México se presentan abundantes yacimientos de gas y petróleo a profundidades entre 4000 y 18000 pies, así como también abundantes hidratos de gas en la sección superficial, sin

embargo, su relación no se ha estudiado como tampoco la distribución de los hidratos que deberían formarse en zonas cercanas a las fallas, las cuales están a su vez entrapando yacimientos profundos de gas.

### 3. Objetivos.

Para soportar la relación directa entre los hidratos de gas que ocurren en zonas someras en la cuenca Browse y los yacimientos profundos de gas convencional de la Formación Plover, se requiere desarrollar los siguientes objetivos específicos:

- Investigar los atributos sísmicos que resalten las zonas saturadas de gas, mediante la aplicación de algoritmos convencionales.
- Identificar y delinear los reservorios saturados de gas en las secciones profundas y someras mediante el uso de atributos sísmicos los cuales se trabajan a partir de la información sísmica en tres dimensiones (3D) disponible en el bloque Poseidón 3D y registros de pozo.
- Delimitar las zonas saturadas de gas mediante la aplicación de atributos de energía, frecuencia instantánea y coherencia y al mismo tiempo realizar la comparación entre las secciones sísmicas originales y las interpretadas.
- Identificar la presencia de fallas que sirvan como vías de migración del gas de los yacimientos de la Formación Plover hacia la sección sedimentaria superficial.
- Analizar el papel de sello que cumple los hidratos de gas BSR para las acumulaciones de gas libre asociadas a hidratos de metano en el bloque de estudio mediante su identificación y delineación con el uso de atributos sísmicos.
- Calcular las condiciones de temperatura y presión en los yacimientos de hidratos de metano para explicar su presencia en los sedimentos someros mediante la elaboración del diagrama de estabilidad.

#### 4. Justificación del Proyecto.

La cuenca Browse en la zona *offshore* del Noroeste australiano es una cuenca con un gran potencial hidrocarburífero sobre todo en recursos de gas, las actividades de exploración en la cuenca han sido limitadas debido a dificultades técnicas y logísticas innatas a las actividades *offshore*, sin embargo, los hallazgos han sido muy favorables siendo uno de estos el hallazgo del mayor campo de gas de Australia llamado Torosa descubierto en el año 1971.

La utilización de los atributos sísmicos propuestos en este trabajo para el bloque Poseidón 3D, proporcionara un aporte al conocimiento geológico del área donde el estudio de yacimientos de gas asociados a hidratos de metano es escaso y limitado. De igual manera se analizará si existe una relación entre las acumulaciones de gas convencionales reportadas con las posibles acumulaciones de gas no convencional de hidratos de metano.

Los hidratos de metano son reservorios de un alto interés tanto económico como científico por múltiples razones, algunas de ellas siendo que los hidratos de gas contienen un muy alto contenido de metano en su estructura, pero la determinación exacta de estas cantidades no está bien definida.

Este tipo de reservorios no convencionales poseen gran cantidad de carbono orgánico, que no ha sido considerado para el estudio del ciclo global del carbono, como factor ambiental los hidratos de metano son naturalmente una trampa para este gas pero si el reservorio es perturbado o explotado de forma incorrecta, este recurso puede transformarse en riesgo geológico o *Geo Hazard* que liberaría grandes cantidades de metano a la atmósfera, lo que aumentaría el efecto invernadero y por consiguiente el calentamiento global.

La correcta identificación del BSR y de zonas saturadas con gas libre en secciones sísmicas mediante el uso de atributos sísmicos es de gran importancia para el aprovechamiento de este recurso energético y de igual forma para la mitigación de potenciales *Geo Hazards*.

En la cuenca Browse la identificación del BSR ha sido particularmente difícil debido a la limitada exploración, este estudio pretende utilizar información sísmica y de pozo recientemente liberada al público del bloque Poseidón 3D para identificar zonas saturadas de gas asociadas a reservorios convencionales y no convencionales como los hidratos de metano.

La identificación de nuevas zonas saturadas de gas en estratos someros por debajo del BSR representaría una posibilidad de recursos energéticos no reportados anteriormente y serían una adición a los recursos convencionales ya reportados en la literatura.

Finalmente, la presencia de hidratos de gas relacionados con yacimientos profundos de gas puede ayudar a disminuir el riesgo exploratorio ya que la formación de zonas de hidratos de gas puede estar relacionado con fallas que en profundidad están relacionadas con entrapamientos de gas y en superficie con la migración de este hidrocarburo y la subsecuente formación de hidratos de gas en conjunto con el entrapamiento de gas libre por debajo del BSR, este tipo de relación ha sido mencionado por García González *et al.*, (2019).

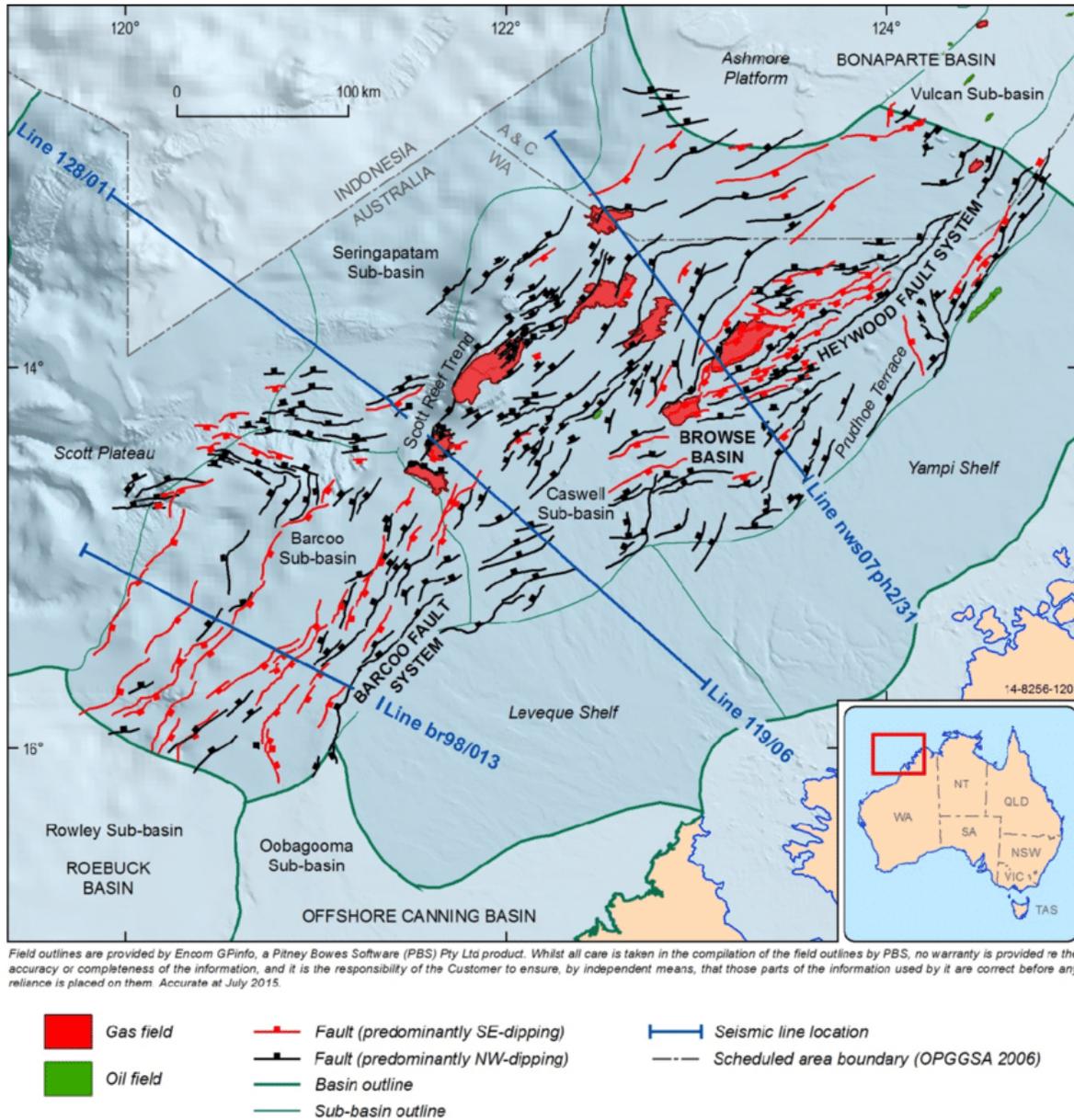
## **5. Marco de Referencia.**

### **5.1 Marco Geológico.**

La Cuenca Browse se compone por la Plataforma Leveque, la Plataforma Yampi, la subcuenca Barcoo, Caswell y Seringapatam y el *Plateau* Scott (Figura 2).

Figura 2.

Mapa de elementos tectónicos de la cuenca Browse.



Nota: Tomado de Regional Geology of the Browse Basin. Geoscience Australia.

La Cuenca Browse del Carbonífero Tardío-Cenozoico es una gran cuenca *offshore* en el noroeste del margen australiano. Esta cuenca es una provincial hidrocarburifera probada, con grandes campos no desarrollados de gas y condensados en la parte central y distal de la cuenca y con pequeños descubrimientos de crudo en el margen oriental. Las reservas identificadas a finales del año 2000 fueron de 0.48 GL de crudo, 94.3 GL de condensados y 858.96 BCM de gas (*Geoscience Australia <http://www.ga.gov.au>*).

El análisis geoquímico (incluidos biomarcadores y datos isotópicos) realizado a muestras de crudo, condensados y gases muestra que existen por lo menos cuatro familias de hidrocarburos en la cuenca. (Kennard *et al.*, 2004).

La Cuenca Browse se desarrolló durante seis etapas tectónicas principales: La extensión del Carbonífero Tardío al Pérmico Temprano; La subsidencia termal del Pérmico Tardío al Triásico; La inversión del Triásico Tardío al Jurásico Temprano; La extensión del Jurásico Temprano al Jurásico Medio; La subsidencia termal del Jurásico Tardío al Terciario Temprano y la inversión del Mioceno Tardío. La extensión inicial dio como resultado estructuras de *half-graben* y la formación de dos depocentros distintos, las subcuencas Caswell y Barcoo. Estos depocentros contienen una sección sedimentaria con espesores superiores a los 15 Km con una columna de agua entre los 100 y los 1500 metros de profundidad. La cuenca Browse marginal se encuentra en el *plateau* Scott de aguas profundas con una columna de agua entre los 1500 a 4000 metros de profundidad (*Geoscience Australia <http://www.ga.gov.au>*).

La sección del Carbonífero es predominantemente fluvio-deltaica y la sección del Pérmico-Triásico Temprano es de ambiente marino. Las rocas del Triásico Medio a Tardío incluyen rocas clásticas de ambientes fluviales y marinos someros y en menor cantidad rocas carbonáticas. Los

sedimentos del sin-rift del Jurásico Temprano son de ambientes deltaicos y de planicie costera con presencia de carbones. Eventos masivos de erosión ocurrieron en las areniscas del Calloviano y del Jurásico Superior con presencia de *onlaps* en shales que forman sellos regionales delgados para las estructuras pre-Callovianas. La transgresión regional inició en el Valaginiano y tuvo su pico en el Turoniano resultando en la depositación de secciones gruesas de arcillolitas de ambiente marino. La sección del Turoniano-Terciario evidencia un gran ciclo progradacional de sedimentos clásticos a carbonáticos (*Geoscience Australia <http://www.ga.gov.au>*).

Las arcillolitas del Cretácico Temprano proveen un sello regional grueso y también poseen el potencial de ser rocas fuente de hidrocarburos líquidos. Potenciales rocas fuente también se han identificado en el Jurásico Tardío, Jurásico Temprano a Medio, Triásico y las secuencias Paleozoicas de la etapa sin-rift. Las facies reservorio se encuentran mejor desarrolladas dentro de la sección fluvio-deltaica del Jurásico Temprano a Medio y los abanicos submarinos del Berriasiano, Barremiano, Campaniano y Maastrichtiano (*Geoscience Australia <http://www.ga.gov.au>*). (Figura 3).

Figura 3.

Línea sísmica regional de la Cuenca Browse.

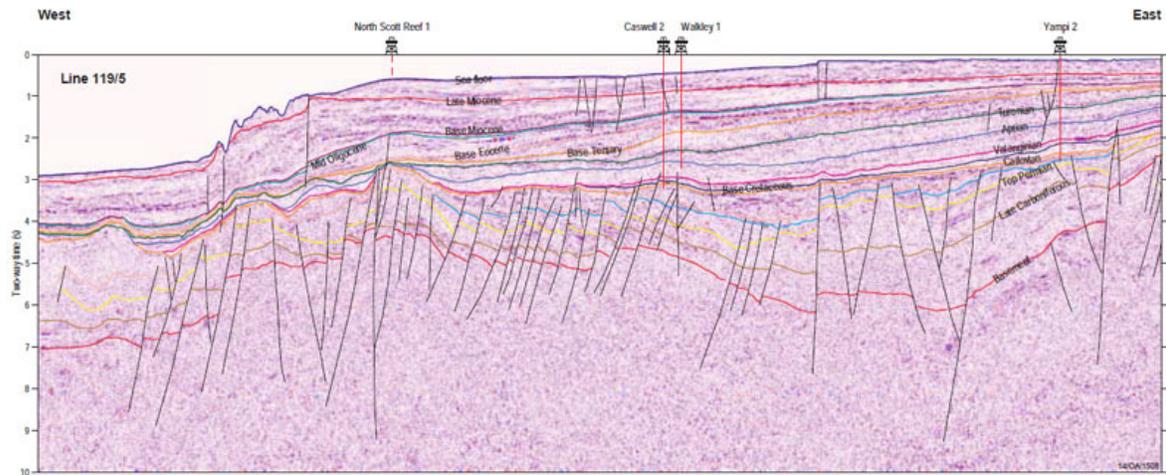
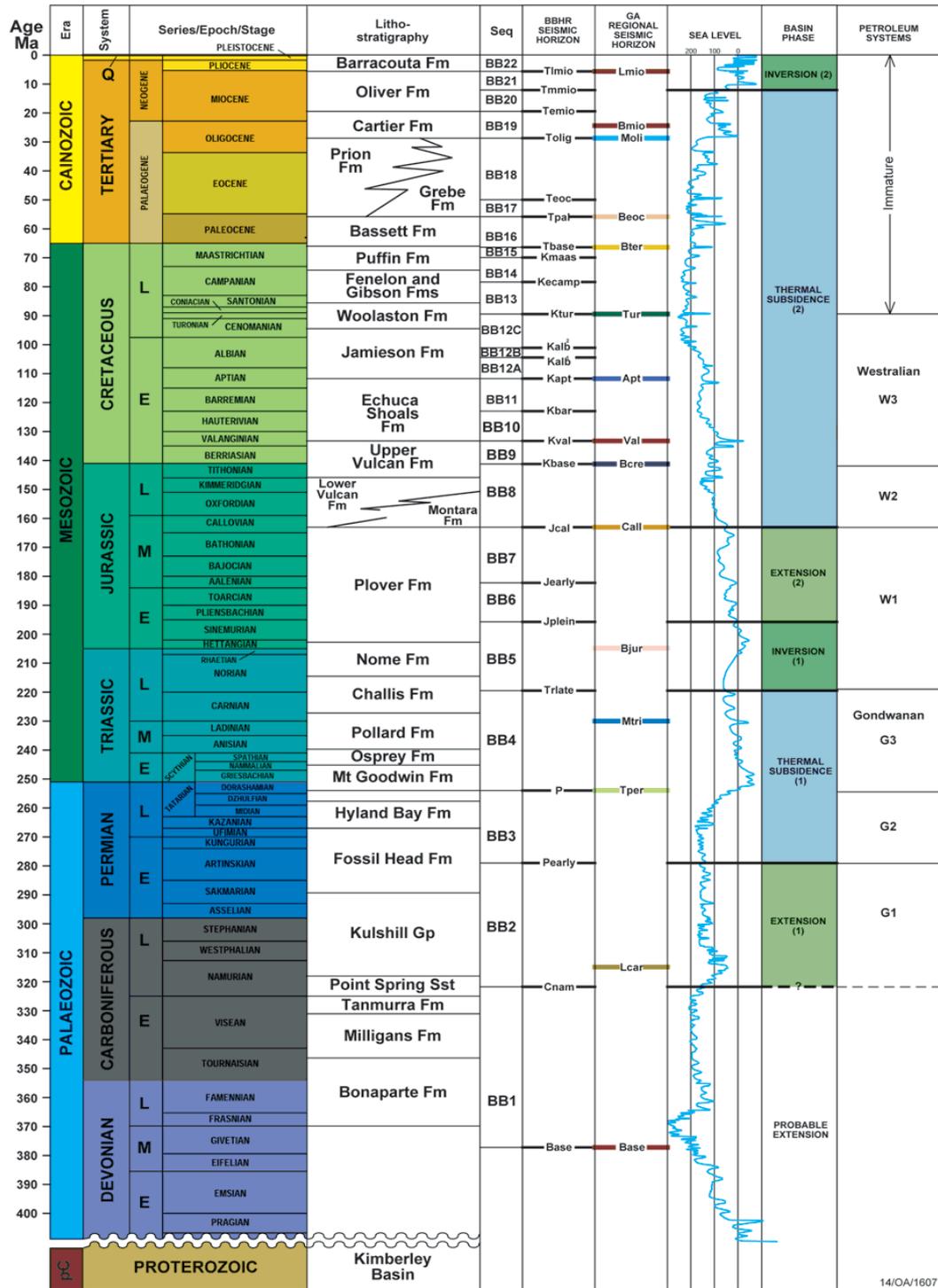
Nota: Tomado de Geoscience Australia <http://www.ga.gov.au>

Figura 4.

Columna estratigráfica generalizada de la Cuenca Browse.



Nótese que la columna estratigráfica muestra un registro desde el Devónico hasta el Cuaternario en la cual se reconocen 22 secuencias sedimentarias relacionadas con 22 horizontes sísmicos.

Tomado de Geoscience Australia <http://www.ga.gov.au>

## **5.2 Marco Teórico.**

Este trabajo se basa en el uso de una metodología existente de interpretación propuesta por Chopra, S. y Marfurt, K. (2007) para identificar y delinear zonas saturadas de gas. En el caso concreto de este estudio se enfocarán en las formaciones Jurásicas del área y las zonas por debajo del BSR donde se propone la aplicación e interpretación de atributos sísmicos geométricos y estratigráficos para finalmente lograr una mejor identificación de los recursos de gas metano presentes en bloque Poseidon 3D. La aplicación del principio fisicomatemático de atributos sísmicos es el mismo para reservorios convencionales y no convencionales de gas, ya que el factor determinante es la saturación misma de gas independiente de la naturaleza del reservorio que se encuentre.

### **5.2.1 Atributos sísmicos.**

Los atributos pueden ser calculados de datos pre apilado (*pre-stack*) o post apilado (*post-stack*) y antes o después de la migración en tiempo. Este procedimiento de cálculo es el mismo en todos los casos, donde la diferencia radica en que, dependiendo del tipo de atributo a analizar, el cálculo se debe realizar en uno de los pasos nombrados anteriormente. Los atributos pueden ser clasificados de diferentes maneras, pero en este trabajo se utilizará la clasificación propuesta por Taner (2001).

#### **5.2.2 Atributos Pre Apilado (*Pre-stack*).**

Los atributos pre apilado utilizan como dato de entrada los CDP (*Common Depth Point*), estos llevan información de azimuth y *offset*, el computo de estos datos resulta en una gran cantidad de

información por lo tanto no son prácticos para estudios iniciales. Sin embargo, esta información puede estar directamente relacionada con el contenido de fluidos y con la orientación de fracturas.

### ***5.2.3 Atributos Post Apilado (Post-stack).***

El apilamiento es un proceso de promedio que elimina el *offset* y la información de azimuth, los datos de entrada pueden ser los CDP apilados o migrados. Debe tenerse en cuenta que los datos migrados en tiempo mantienen sus relaciones en tiempo, por lo que las variables temporales como la frecuencia van a mantener sus dimensiones físicas. Para datos migrados en profundidad, la frecuencia es reemplazada por el número de onda, el cual es una función de la velocidad de propagación y la frecuencia. Los atributos *post-stack* son útiles desde un punto de vista inicial para visualizar grandes cantidades de datos. Dentro de los atributos post apilado encontramos los siguientes:

### ***5.2.4 Atributos Instantáneos.***

Son atributos los cuales se calculan traza a traza y representan los cambios de varios parámetros, para el cálculo de estos atributos se toma la traza original y se convierte en traza analítica por medio de la transformación de Hilbert (Taner *et al.*, 1979). Dentro de los atributos instantáneos se encuentra la envolvente instantánea o magnitud de reflexión y sus derivadas, frecuencia y fase instantánea, las cuales pueden ser calculadas a partir de trazas complejas. Esta clase de atributos serán el foco en este estudio para la identificación del BSR, sin descartar los demás atributos.

**5.2.4.1 Magnitud de Reflexión.** Según Taner et al., (1979), la magnitud de reflexión, también llamada la energía de la envolvente, es simplemente la expresión de la envolvente de amplitud de la traza sísmica y es independiente de la fase. Sus valores son siempre mayores o iguales a cero y se define matemáticamente como:

$$e(t) = [r^2(t) + q^2(t)]^{1/2}$$

Donde:

$e(t)$  es la energía de la envolvente

$r(t)$  es la traza sísmica real

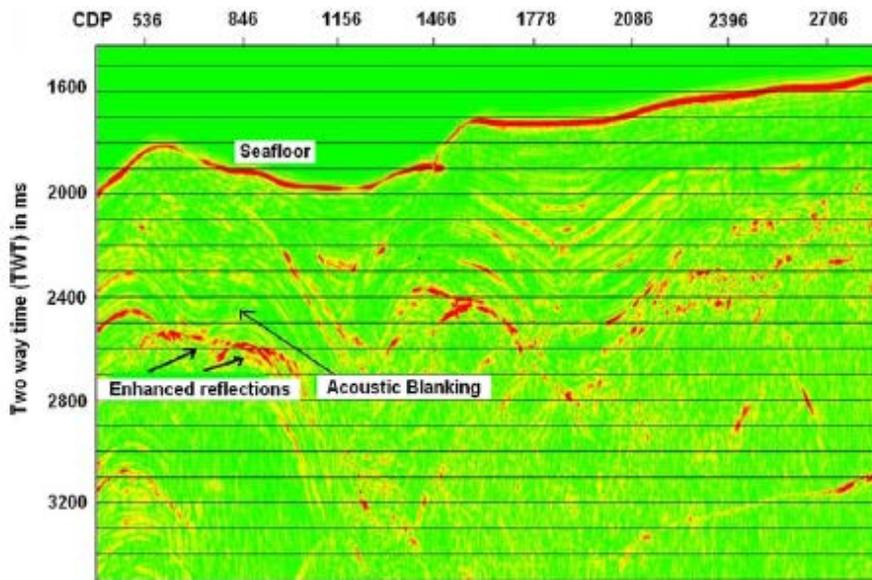
$q(t)$  es la cuadratura de la traza sísmica.

Puede tener sus valores máximos en puntos diferentes a los picos y valles de la traza real, esto se observa especialmente cuando el evento es el compuesto de varias reflexiones. Este atributo es muy útil para la identificación de cambios en el contraste de impedancia sísmica y es comúnmente asociado a cambios litológicos entre rocas como discontinuidades, y otros límites estratigráficos asociados a cambios fuertes del nivel del mar o ambientes de depositación, y en el caso de este estudio es muy útil para la identificación del BSR.

Este atributo depende del contraste de impedancia sísmica, que es el producto de la velocidad de la onda P y la densidad, y varía directamente con la velocidad de la onda P. La velocidad de la onda P depende del porcentaje de gas libre en espacio poroso (Domenico 1977) y cualquier cambio en el porcentaje de gas presente resulta en fuertes reflexiones, llamados “*Bright Spots*” (Figura 5).

Figura 5.

Plot de magnitud de reflexión donde se observa el BSR resaltado como una enhanced reflection.



Nota: Tomado de Satyavani et al., (2008).

**5.2.4.2 Fase Instantánea.** La fase instantánea se define matemáticamente por la expresión:

$$p(t) = \tan^{-1} \left[ \frac{q(t)}{r(t)} \right]$$

Donde:

$p(t)$  es la traza de fase instantánea

$q(t)$  es la cuadratura de la traza sísmica

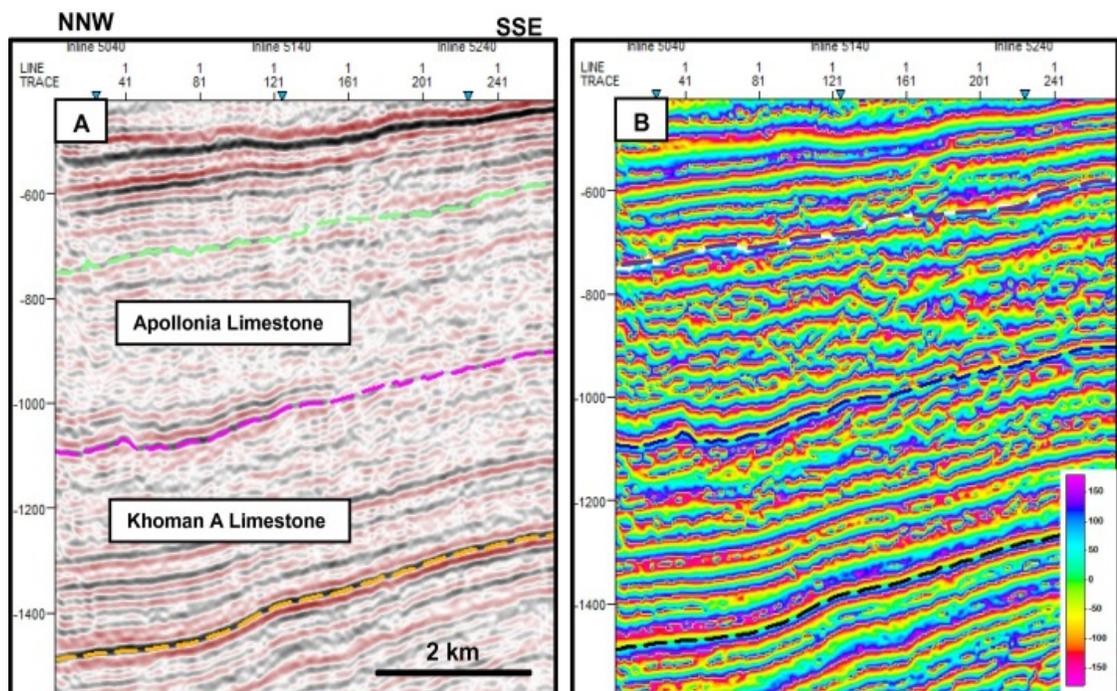
$r(t)$  es la traza sísmica real.

Este es un atributo muy efectivo para resaltar discontinuidades de los reflectores, fallas y cambios laterales en la estratigrafía los cuales pueden estar afectando los

intervalos saturados en gas, o la continuidad de reflectores específicos a identificar como el BSR. Son atributos instantáneos que se calculan en el pico de la envolvente de la traza sísmica y tienen una relación directa con la transformada de Fourier de la ondícula en la vecindad del pico de la envolvente (Taner *et al.*, 1979) (Figura 6).

Figura 6.

*Imagen comparativa de una sección sísmica sin atributos (A) y otra con el atributo de fase instantánea (B).*



Nota: Tomado de Sarhan. M., (2017).

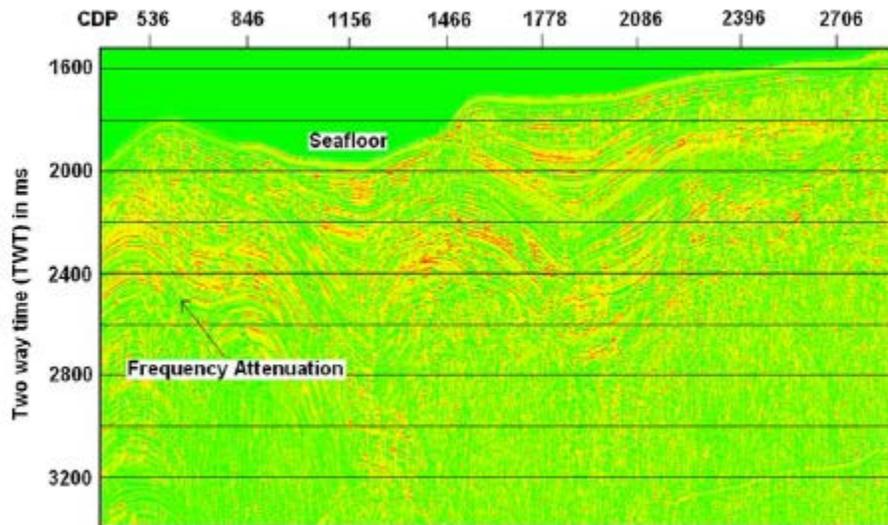
**5.2.4.3 Frecuencia Instantánea.** La frecuencia instantánea es la derivada de la fase instantánea en el tiempo, definida matemáticamente por la expresión:

$$\frac{dp(t)}{dt} \text{ siendo } p(t) \text{ la traza de la fase instantánea}$$

donde un display de frecuencia instantánea muestra la variación de la frecuencia dominante de la traza sísmica (Chopra, S., Marfurt, K. 2007), la forma de una reflexión cambia gradualmente a medida que la secuencia de capas cambia tanto en litología como espesor. En estos casos la frecuencia instantánea es una buena herramienta de correlación, debido a que los pinchamientos o los bordes de las interfaces de hidrocarburo-agua tienden a cambiar la frecuencia instantánea más rápidamente (Taner *et al.*, (1979); Taner (2001). Las reflexiones de los reflectores que se encuentran por debajo de los reservorios de gas, condensados y otros hidrocarburos tienden a cambiar la frecuencia hacia las partes inferiores debido a que el gas filtra las frecuencias altas por absorción (Taner et al. 1979; Taylor 2000). Esta propiedad de la frecuencia instantánea es la que permite la separación e identificación de regiones de alta y baja atenuación, donde las sombras de baja frecuencia se asocian al gas libre que ocurre por debajo de reflectores fuertes lo que indica un gran contraste de velocidades. La frecuencia instantánea también ayuda a diferenciar las zonas saturadas de gas libre de zonas con sedimentos saturados de hidratos o salmuera (Satyavani et al. 2005). (Figura 7).

Figura 7.

*Plot de frecuencia instantánea donde se observan las regiones de atenuación de altas frecuencias.*



Nota: Tomado de Satyavani et al., (2008).

### 5.2.5 Atributos Geométricos.

**5.2.5.1 Coherencia.** Dentro de los atributos geométricos se encuentra el atributo de Coherencia el cual permite medir la continuidad lateral de unidades y eventos, en donde los colores claros representan un alto grado de continuidad y los oscuros muestran discontinuidades estratigráficas o estructurales como fallas. Según Chopra y Marfurt (2007), la coherencia puede ser calculada a partir de la estimación de la varianza de las trazas sísmicas de un reflector mediante la expresión matemática formal:

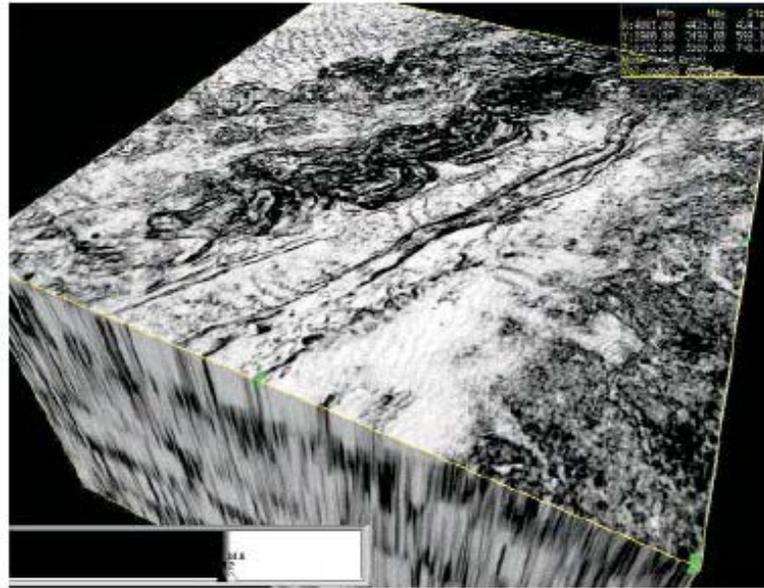
$$var(t, p, q) = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J [u_j(t - px_j - qy_j) - \langle u(t, p, q) \rangle]^2$$

donde  $\langle u(t, p, q) \rangle$  se define como  $\langle u(t, p, q) \rangle \equiv \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J u_j(t - px_j - qy_j)$ .

Donde  $\langle u \rangle$  se calcula para cada plano paralelo al reflector dentro de la ventana de análisis. En resumen, la varianza es una medida de correlación de la forma en que cada traza encaja con la traza promedio. Si todas las trazas son iguales, la varianza estimada de la coherencia es 0.0. Sin embargo, aun si todas las trazas tienen la misma forma de onda, si sus amplitudes son diferentes, el valor de la varianza es mayor a 0.0. (Figura 8).

Figura 8.

Cubo sísmico en coherencia donde se observa la continuidad lateral de las unidades estratigráficas.



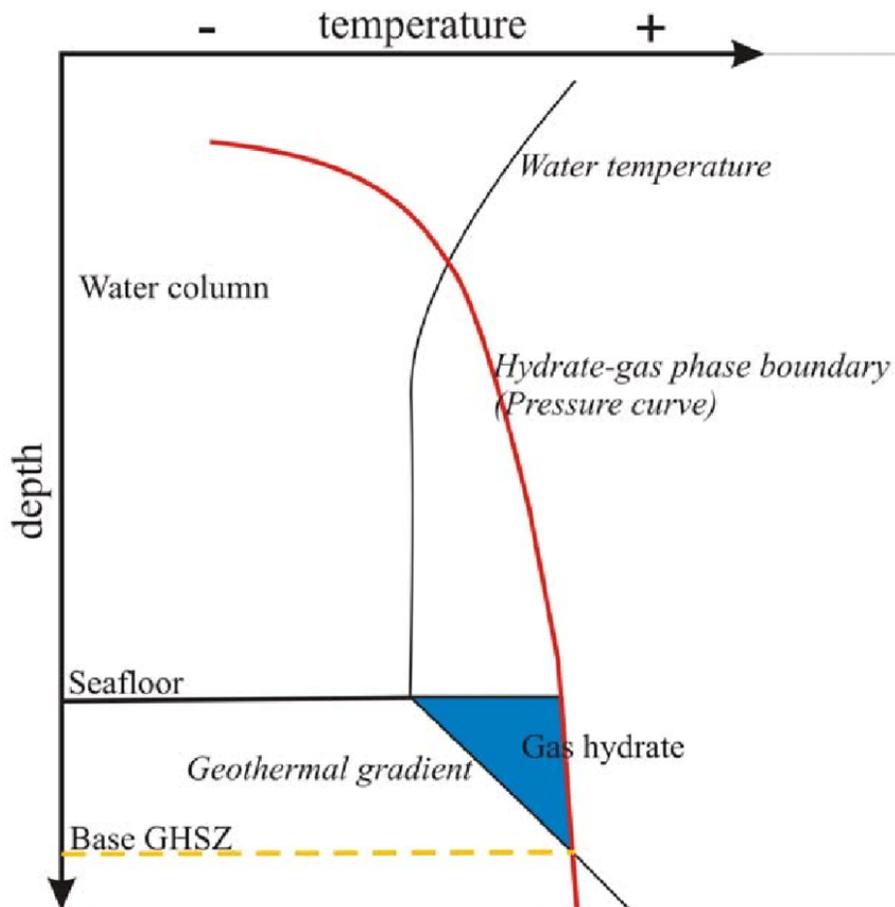
Nota: Tomado de Taner et al., (2001).

### 5.2.6 Hidratos de metano.

Los hidratos de metano son estructuras cristalinas tipo hielo que se forman cuando gas de bajo peso molecular como el metano, etano o dióxido de carbono se mezcla con el agua y al congelarse forman un sólido bajo condiciones de baja temperatura y presión moderada (Figura 9.). En condiciones normales la relación molar entre metano y agua es de 1:6 para un hidrato ideal (Kvenvolden., 1988). La ocurrencia de estos hidratos se infiere a través de identificación, por medio de técnicas geofísicas, de un reflector anómalo que coincide con la transición hacia la zona de hidratos conocido como el *Bottom Simulating Reflector* o BSR debido a que típicamente es sub-paralelo a la topografía del fondo marino.

Figura 9.

Diagrama esquemático de la zona de estabilidad de los hidratos de gas (GHSZ) en sedimentos marinos.



La base del GHSZ es donde la curva de gradiente geotérmico se intersecta con la curva de estabilidad de los hidratos, el tope de la GHSZ se encuentra en la columna de agua donde la curva de gradiente hidrotermal se intersecta con la curva de estabilidad de los hidratos. Tomado de Plaza, A., (2020).

El BSR es caracterizado por presentar un alto contraste de impedancia acústica entre los sedimentos infrayacentes saturados de gas y la intensidad del reflector es muy sensible a la concentración de gas presente en los poros de los hidratos (Holbrook *et al.*, 1996 tomado de Satyavani *et al.*, 2008).

La estabilidad de los hidratos de metano es afectada por la composición del gas y por las impurezas iónicas del agua (Kvenvolden., 1988), estas características junto a condiciones de presión y temperatura definen lo que se conoce como la zona de estabilidad de los hidratos de gas o GHSZ por sus siglas en inglés.

Para el cálculo de la curva de estabilidad de fase de los hidratos de metano se tomó como base la metodología propuesta por Wang *et al.*, (2006) con los datos de gradiente geotérmico de la zona provistos por el WCR del pozo Poseidon-2 (Figura 35.) junto con datos de profundidad de la columna de agua y profundidad del BSR por medio de las fórmulas:

$$(1) T_{sed} = G * \frac{A}{1000} + 373.41 * B^{-0.6269}$$

$$(2) T_{est} = 7.0724 * \ln(D) - 29.970$$

Donde para la formula (1) de cálculo de la temperatura de los sedimentos a una profundidad específica, G es el gradiente geotérmico, A es la profundidad de la zona de interés por debajo del fondo marino, siendo en este caso la profundidad del BSR que es de 533m a partir del fondo marino. Esta profundidad se calculó utilizando la velocidad de onda provista por el WRC del pozo Poseidon-2 que corresponde a 1524 m/s. Y B es la profundidad de la columna de agua que para el caso de la zona de estudio es de 550 m. Para la formula (2) donde se expresa la relación de la temperatura de estabilidad de los hidratos (Test) con la profundidad (D) para poder mostrar la curva de estabilidad de fase de los hidratos (Figura 34).

### 5.2.7 Modelamiento geoquímico 1D.

Para elaborar el modelo geoquímico en una dimensión (1D) se utilizó el software Petromod de la compañía Schlumberger, el cual elabora el modelo 1D basado en la siguiente secuencia, con base en la información estratigráfica y geoquímica del pozo Poseidon-1: 1) Reconstrucción de la historia de enterramiento siguiendo la metodología de Angevine *et al.* (1990), quienes consideran los cambios de espesores debidos a la compactación de las formaciones rocosas durante el enterramiento lo cual ocasiona cambios en la conductividad térmica de las formaciones rocosas (ver Figura 28), 2) Una vez reconstruida la historia de enterramiento en un diagrama de tiempo contra profundidad, se procedió a reconstruir la historia térmica de la cuenca de Browse durante el proceso de subsidencia, para esto se utilizó el modelo de McKenzie (1978) que calcula la variación del flujo de calor durante el proceso de rifting, que es el estilo tectónico imperante en la cuenca Browse. 3) Los cálculos de la maduración termal del kerógeno presente en la Formación Plover se realizaron con el software Petromod, que utiliza el modelo cinético de Tissot y Welte (1984), el cual calcula la cinética de las reacciones de generación de hidrocarburos, basados en la energía de activación, el tiempo y la temperatura. Los resultados del modelo cinético de Tissot y Welte (1984) se expresan como la tasa de transformación (TR) del kerógeno a petróleo y gas, así mismo el software calcula la variación de la reflectancia de vitrinita a medida que la roca fuente es enterrada en la cuenca (ver Figura 29).

El modelo geoquímico fue calibrado utilizando datos de temperatura de fondo pozo en la cuenca Browse, y de temperatura de pirólisis T<sub>max</sub>.

Al modelo también se le incluyeron los datos de frontera (*Boundary conditions*) requeridos como lo son la paleo profundidad del agua (*Paleo Water Depth PWD*) teniendo en cuenta la historia de la cuenca y los datos actuales de profundidad del fondo oceánico, la temperatura de la

interfaz agua-sedimentos (*Sedimentary Water Interface Temperature SWIT*) se tomó utilizando la herramienta dentro de Petromod donde se utilizó la ubicación geográfica de la zona de estudio. Para el flujo de calor (*Heat Flow HF*) se calcula utilizando el método de McKenzie (1978) tomando la información encontrada en la literatura geológica y en los reportes de completamiento de completamiento de los pozos del área para la temperatura actual de fondo de pozo (BHT).

### **5.2.8 Datos sísmicos.**

Los datos sísmicos se obtuvieron gracias al *Open Sesimic Repository* donde se encuentran datos sísmicos libres y también datos de registros de pozo relacionados con la zona de estudio.

El centro del bloque Poseidón 3D posee coordenadas S 13°14'00"/ E 122°12'00" y alineación NE-SW posee una extensión de 2828 Km<sup>2</sup>. Es un cubo sísmico en tiempo, pre-apilado y migrado con celdas de 18.75x12.5 metros, un intervalo de muestreo de 2ms y una longitud de registro de 7000ms. Adicionalmente se trabajó con información de 8 pozos con un set de registros básicos como porosidad neutrón y densidad volumétrica. Este bloque fue adquirido por CGGVeritas para ConocoPhillips.

Toda esta información se trabajó con el software Petrel de la compañía Schlumberger, dentro de esta plataforma se cargó el cubo sísmico del bloque Poseidón 3D y se cargaron los registros de los 8 pozos que se encontraban disponibles.

## 6. Resultados

A continuación, se exponen los resultados obtenidos de la aplicación de los atributos sísmicos de coherencia, frecuencia instantánea y energía para las inlines 2411, 2851; las xlines 2277, 2675 y un time slice a  $z=1300$  ms ubicados dentro del bloque Poseidón 3D (Figura 10). Las inlines, xlines y time slices seleccionados para este estudio se tomaron teniendo en cuenta su cercanía a los pozos con información básica disponible los cuales son: Proteus-1, Kronos-1, Boreas-1, Poseidon-1, Pharos-1, Poseidon-2, Poseidon-North y Torosa-1 (Figura 11). Se seleccionaron estos pozos para que el análisis de los registros básicos sirva de soporte a los resultados obtenidos por medio de la interpretación de los atributos sísmicos aplicados. Se tomaron estas inlines y xlines para el análisis ya que estas pasan por los pozos Poseidon-2 y Kronos-1 los cuales poseen registro de *checkshot* para sus respectivos topes.

Los perfiles sísmicos fueron interpretados teniendo en cuenta la información disponible de topes de formación contenida en los reportes de completamiento (*Well Completion Report WCR*) y de registros LAS.

Las figuras 12-16 ilustran el perfil sísmico de la inline 2411 donde se exponen los siguientes resultados: 1. Perfil sísmico sin tratamiento por atributos ni interpretación (Figura 12); 2. Perfil sísmico con interpretación de topes, características estructurales y algunos fenómenos de atenuación acústica (Figura 13); 3. Perfil sísmico con tratamiento por medio del atributo de Coherencia donde se resaltan las características estructurales (Figura 14); 4. Perfil sísmico con tratamiento por medio del atributo de Frecuencia Instantánea donde se resaltan los contrastes de frecuencias y se identifica el reflector BSR (Figura 15); 5. Perfil sísmico con tratamiento por medio del atributo de Energía donde se resaltan las zonas de alta energía de reflexión (AER) asociadas al

reflector BSR (Figura 16). A las figuras 17-22 se les realizo el mismo trabajo e interpretación anteriormente expuesto solo que corresponden a la inline 2851. Las imágenes para las xlines 2277 y 2675 encuentran en la sección de Apendices junto con un polígono arbitrario, que envuelve las inlines y xlines interpretadas con sus respectivos pozos, creado para generar un loop sísmico para la observar la consistencia en la interpretación y su respectivo mapa de ubicación. A las figuras 22-25 se les aplico la misma metodología de trabajo con la diferencia que estas muestran time slices del cubo sísmico donde se observan las mismas características anteriormente mencionadas, pero a unas profundidades definidas con mejor perspectiva de la continuidad lateral.

Adicionalmente se presentan resultados de una *cross section* elaborada con 3 pozos donde, por medio del análisis de los registros de pozo porosidad neutrón y densidad volumétrica, se desea observar la presencia de saturación de gas en los reservorios convencionales del área pertenecientes a rocas Jurásicas (Figuras 26-27).

Para el modelo geoquímico 1D se tomó información proveniente del pozo Poseidon-1, en el cual existen datos de %TOC, HI, OI y Tmax. El modelamiento dio como resultado la historia de enterramiento (Figura 28), el modelo de maduración térmica (Figura 29), el modelo de temperatura (Figura 30) y el modelo de presión litostática, hidrostática y de poro (Figura 31).

Finalmente, se analizaron los datos de temperatura obtenidos del modelo geoquímico (Figura 30) con los datos de temperatura del fondo marino del NOAA (Figura 32) y los gradientes geotérmicos del WCR (Figura 33), donde se observa que los datos obtenidos en el modelo son coherentes con los datos de temperatura del WCR y del NOAA.

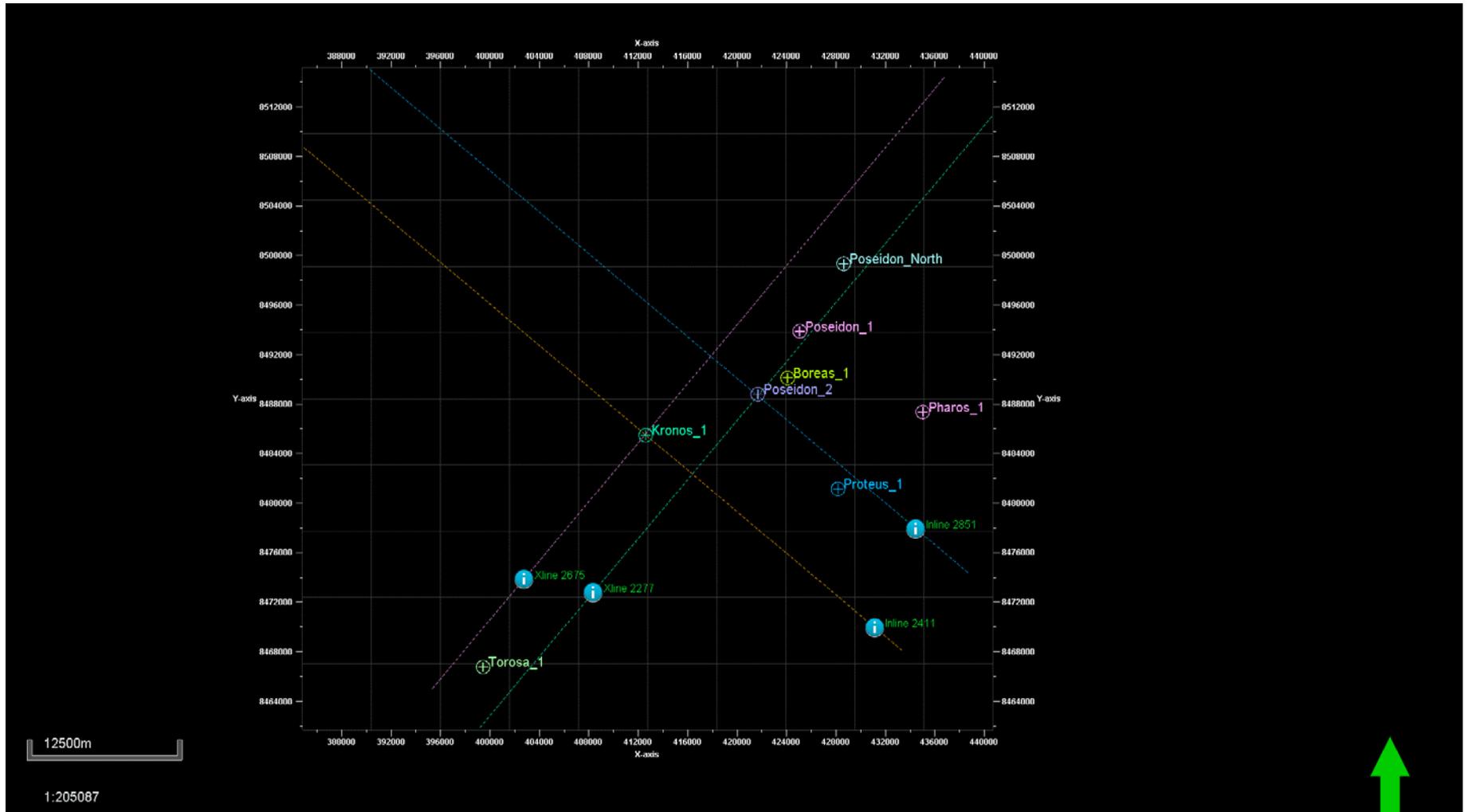
Figura 10.

Bloque Poseidón 3D con los pozos con información disponible en la costa NW de Australia.



Figura 11.

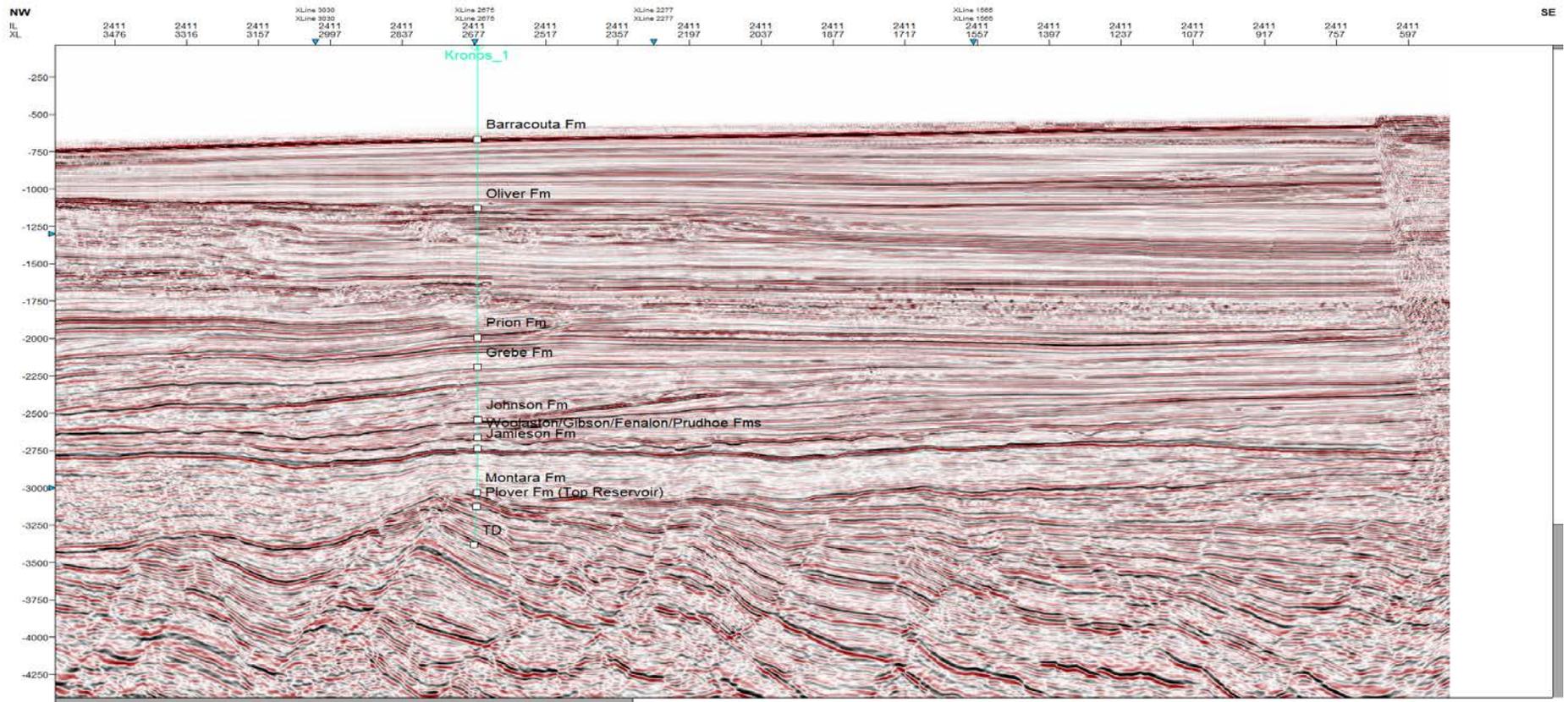
Imagen de planta de las inlines y xlines trabajados para el bloque Poseidon 3D



Estas inlines y xlines fueron seleccionadas bajo el criterio de tener cercanía con los pozos que poseen información de registros básicos como densidad volumétrica y porosidad neutrón e información geoquímica como TOC, HI, OI y Tmax.

Figura 12.

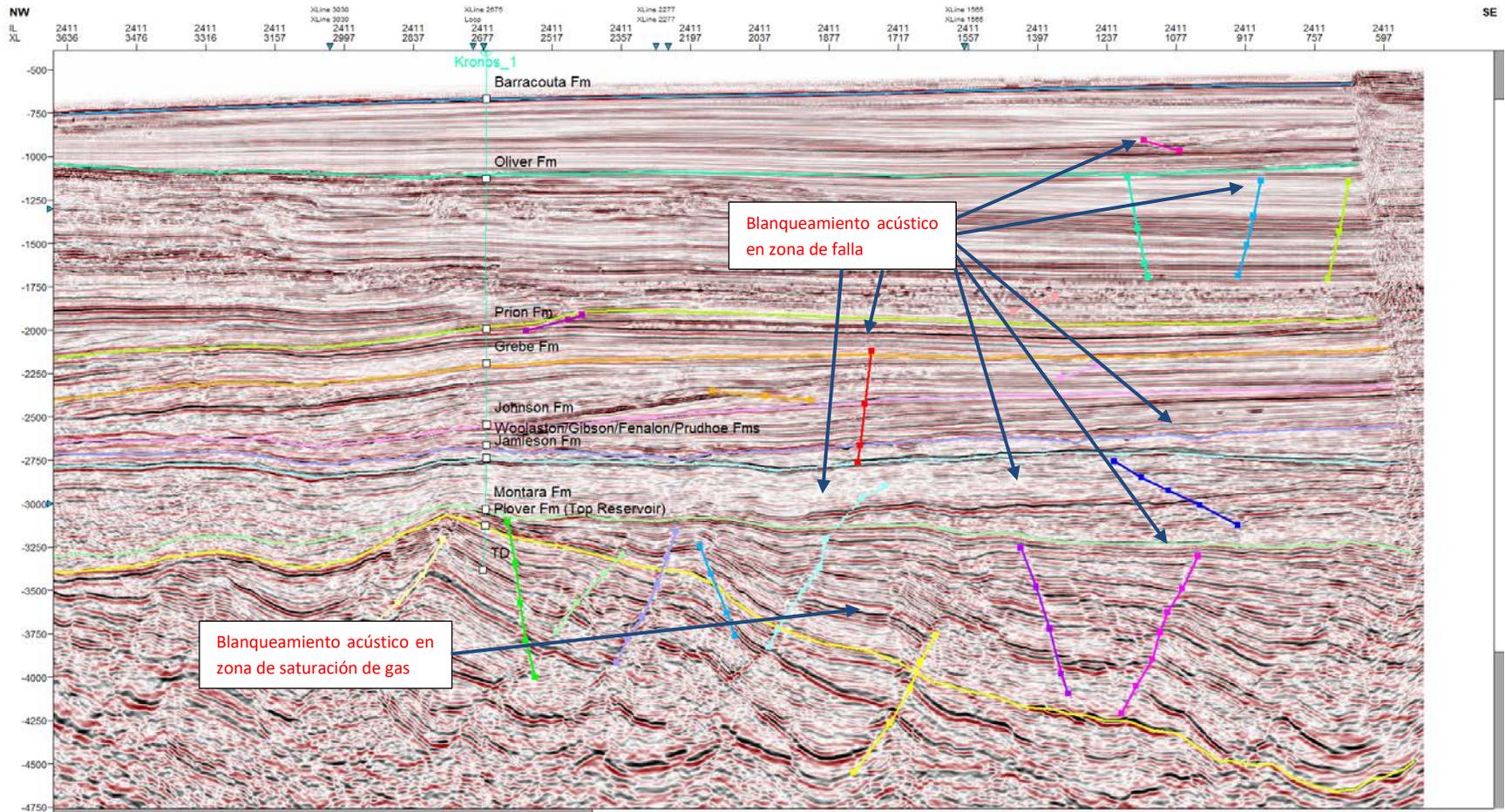
Inline 2411 en dirección NW-SE



Ubicada en el mapa de la Figura 13, que llega hasta los 5000ms y donde se encuentra el pozo Kronos-1 en TWT sin interpretación.

Figura 13.

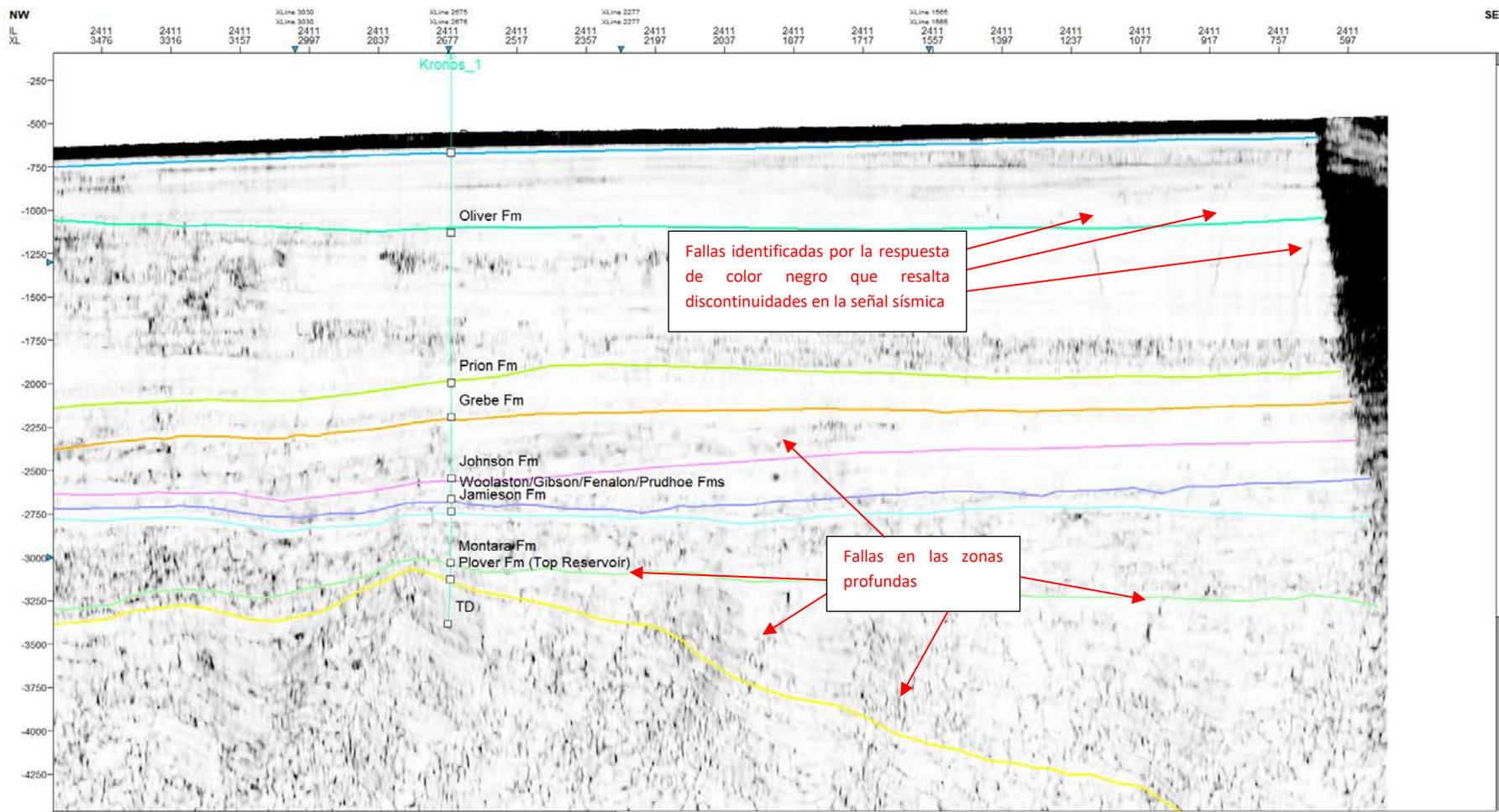
Inline 2411 en dirección NW-SE



Ubicada en el mapa de la Figura 13, que llega hasta los 5000ms en TWT donde se interpretaron los horizontes de 9 formaciones presentes en la zona de estudio, esta imagen se muestra sin atributos sísmicos donde se alcanza a observar el fenómeno de blanqueamiento acústico en zonas de falla y en zonas saturadas de gas (Yuan et al. 1992).

Figura 14.

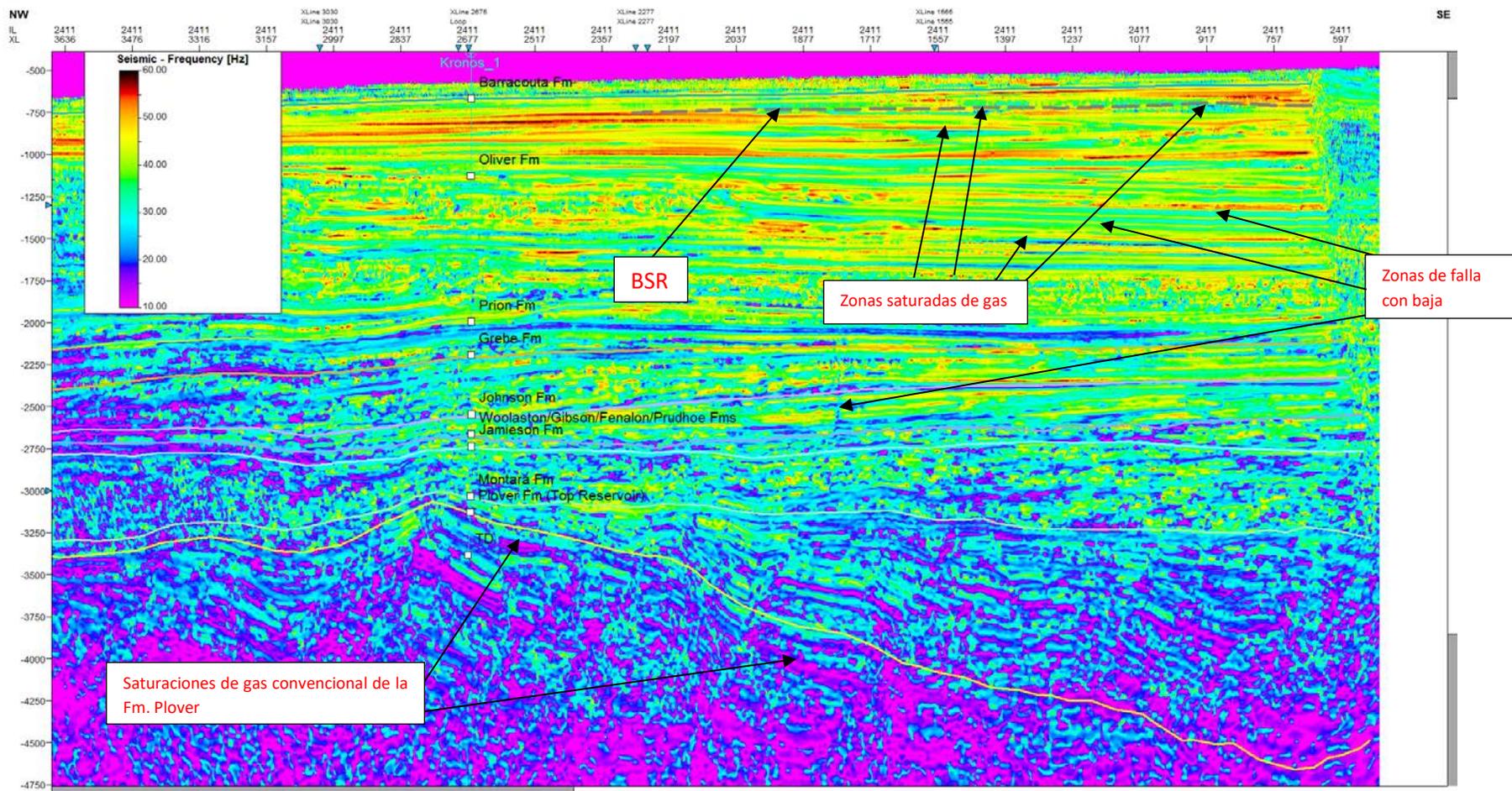
*Inline 2411 en sentido NW-SE*



Ubicada en el mapa de la Figura 13 bajo el atributo de Coherencia que resalta la continuidad de los reflectores sísmicos, donde las zonas continuas presentan una respuesta blanca y las zonas donde se presentan discontinuidades presentan respuestas de color negro (Chopra et al. 2007).

Figura 15.

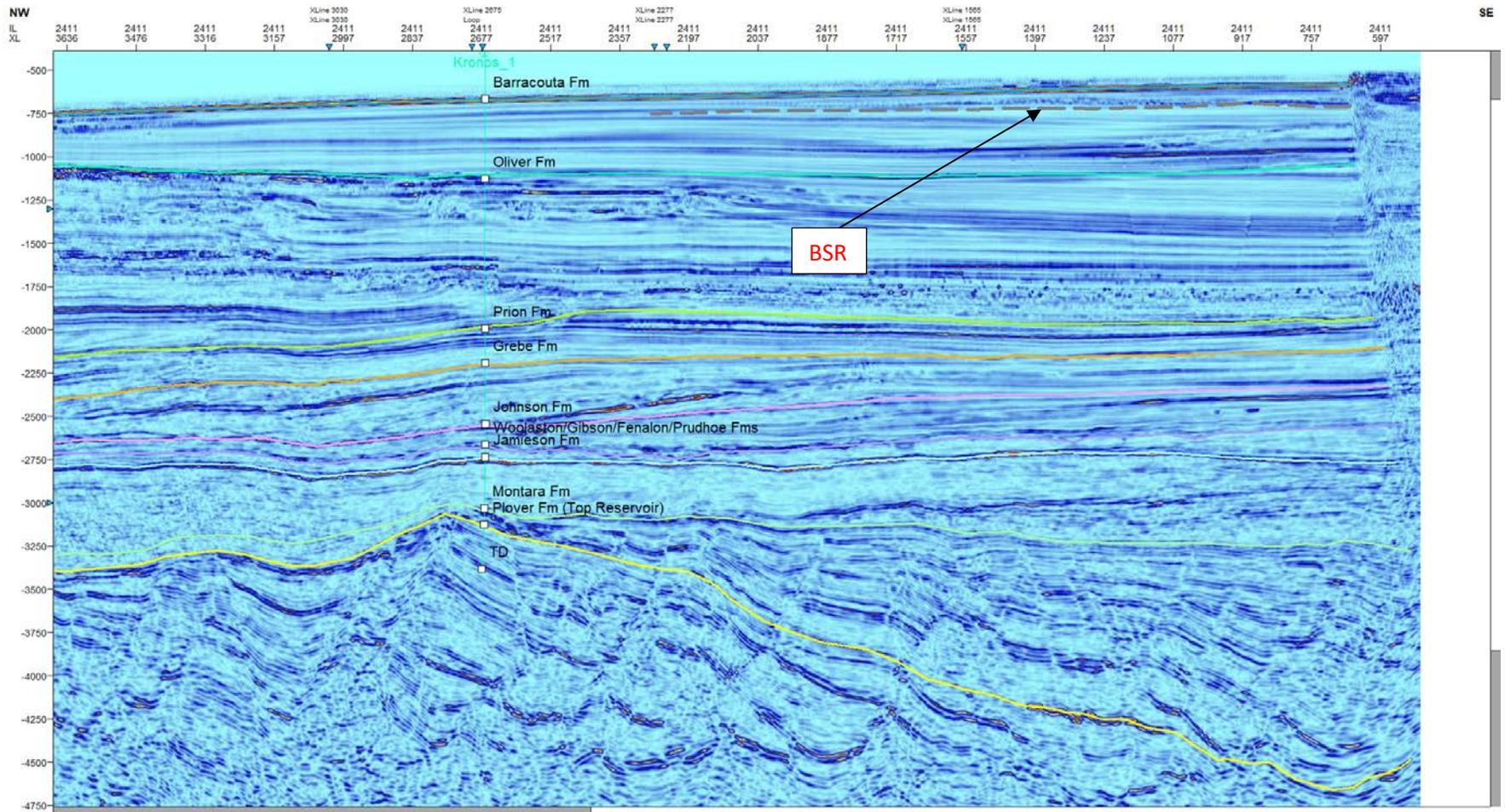
*Inline 2411 en dirección NW-SE*



Ubicada en el mapa de la Figura 13, que llega hasta los 5000ms en TWT donde se interpretaron los horizontes de 9 formaciones presentes en la zona de estudio, en esta imagen se muestra el atributo de frecuencia instantánea en el cual se observa que la zona correspondiente a la Fm. Plover se encuentra en la banda de baja frecuencia (10-30 Hz) lo cual se puede atribuir a saturación de gas, esta formación es el reservorio convencional de gas más prominente del área de estudio. También se puede observar zonas de baja frecuencia en las formaciones suprayacentes, aunque no tan prominentes lo cual podría indicar migración del hidrocarburo proveniente de la Fm. Plover por zonas de fractura presentes en el área. De igual forma se puede identificar un BSR principal a 710ms de TWT, justamente debajo del BSR se observan zonas de bajas frecuencia las cuales se consideran como zonas saturadas de gas para este estudio. Adicionalmente se puede observar que las zonas de falla previamente identificadas con el atributo de coherencia presentan bajas frecuencias, esto se debe a la saturación de gas de estas como conducto de migración del hidrocarburo desde zonas más profundas (Coffin et al. 2014, 2015).

Figura 16.

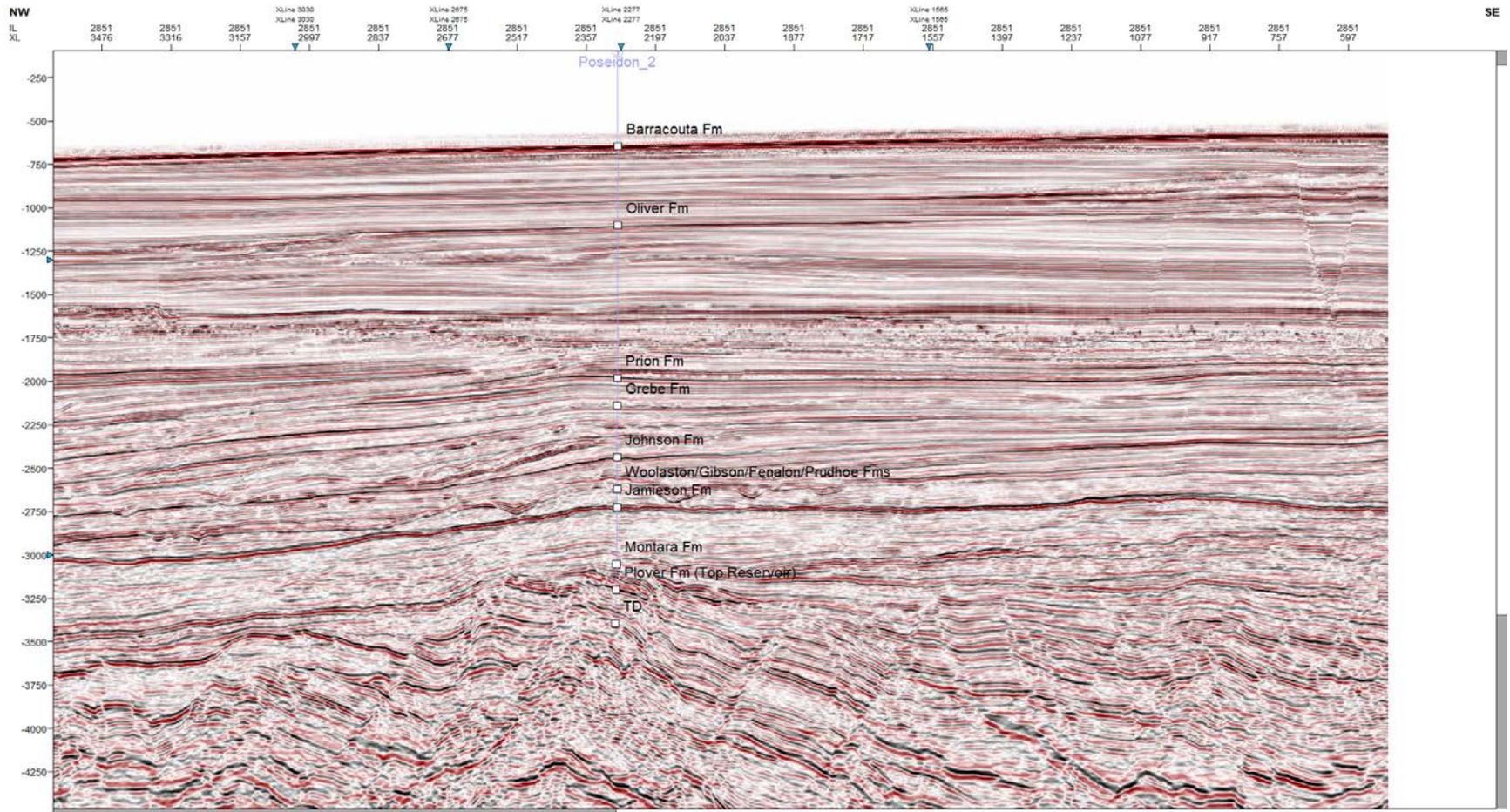
*Inline 2411 bajo el atributo de Energía de reflexión*



Donde se interpreta la presencia de un BSR principal.

Figura 17.

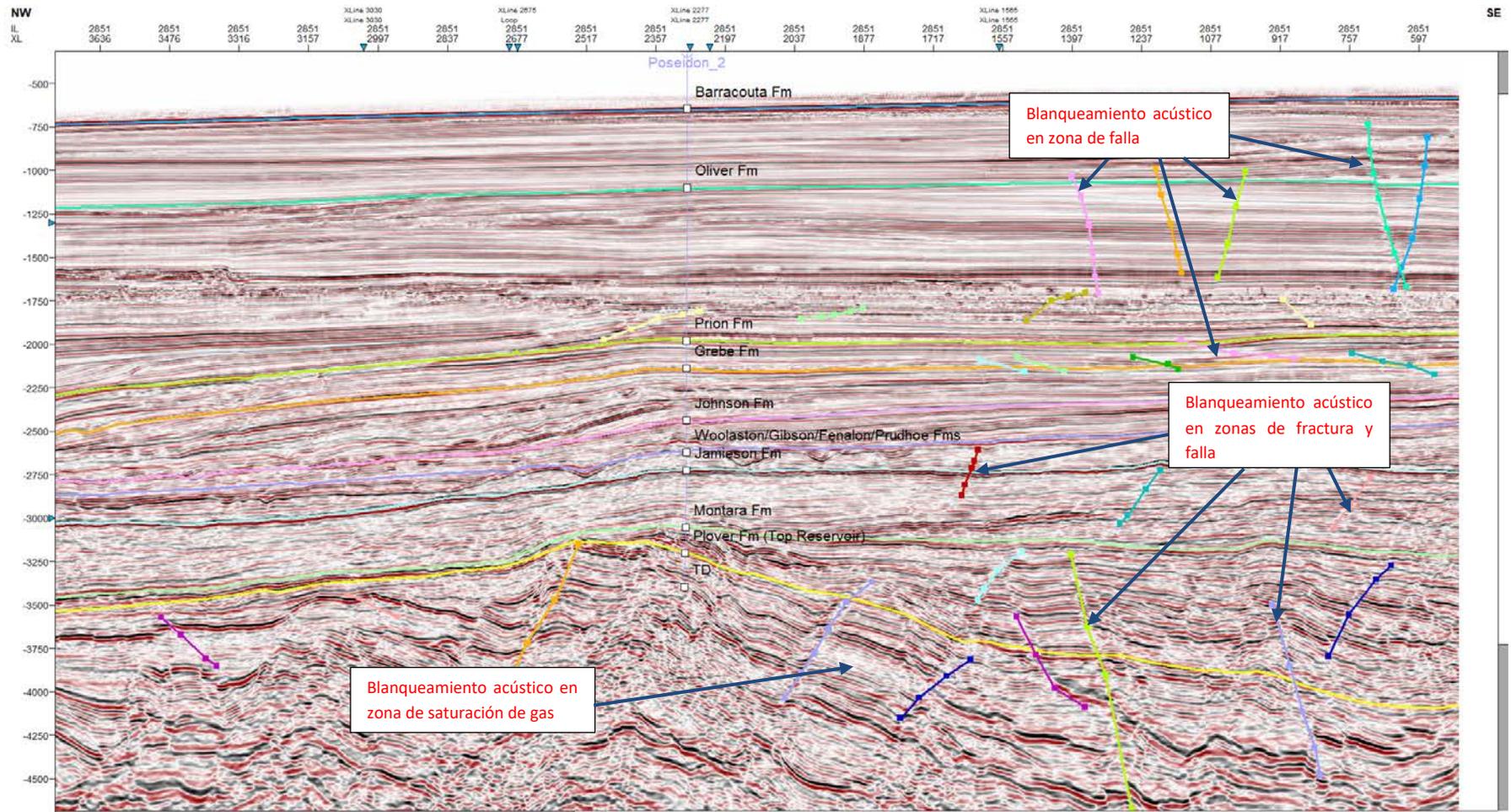
Inline 2851 en dirección NW-SE



Ubicada en el mapa de la Figura 13, que llega hasta los 5000ms y donde se encuentra el pozo Poseidon-2 en TWT sin interpretación.

Figura 18.

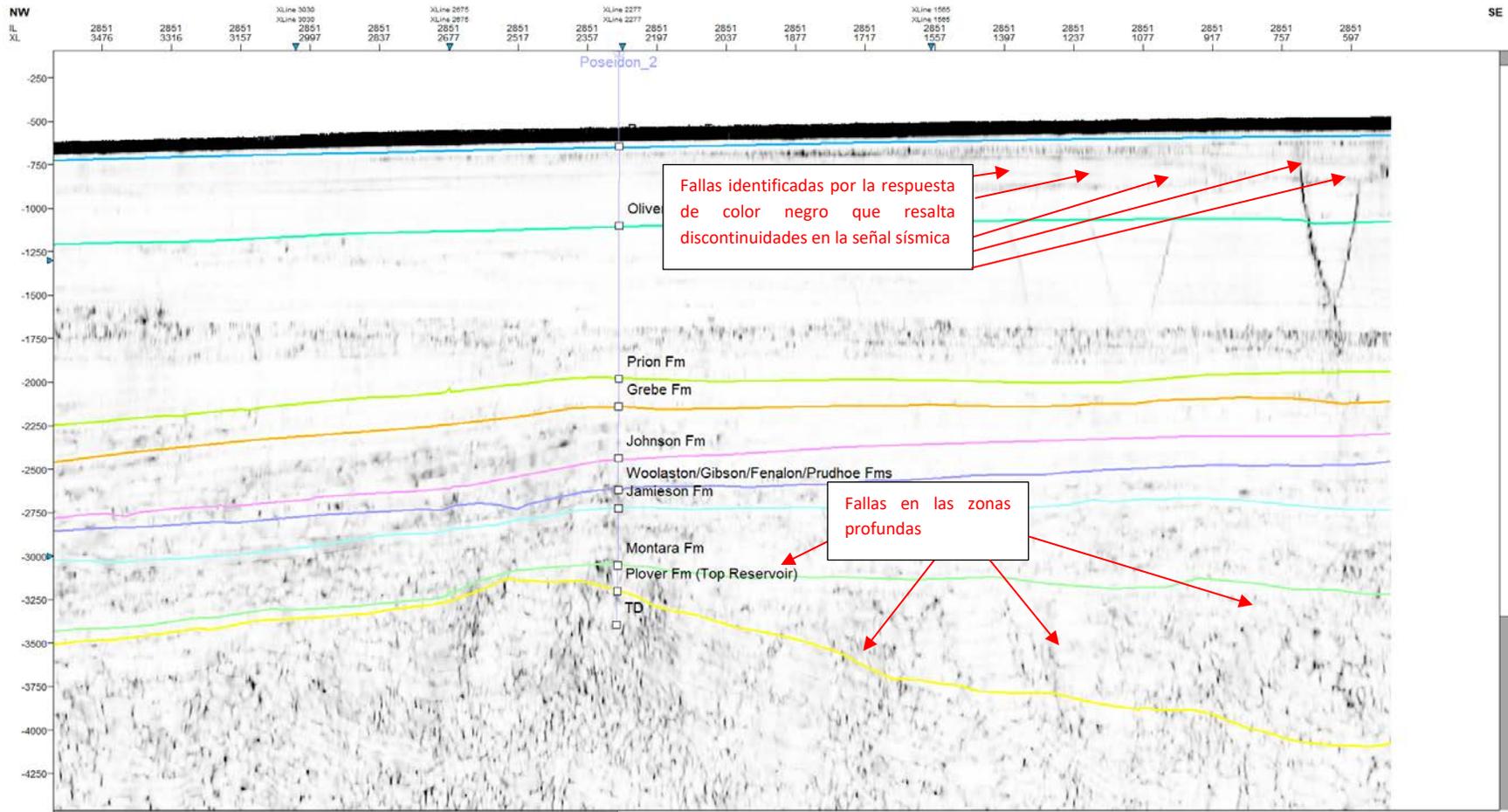
Inline 2851 en dirección NW-SE



Ubicada en el mapa de la Figura 13, que llega hasta los 5000ms en TWT donde se interpretaron los horizontes de 9 formaciones presentes en la zona de estudio, esta imagen se muestra sin atributos sísmicos donde se alcanza a observar el fenómeno de blanqueamiento acústico en zonas de falla y en zonas saturadas de gas (Yuan et al., 1992).

Figura 19.

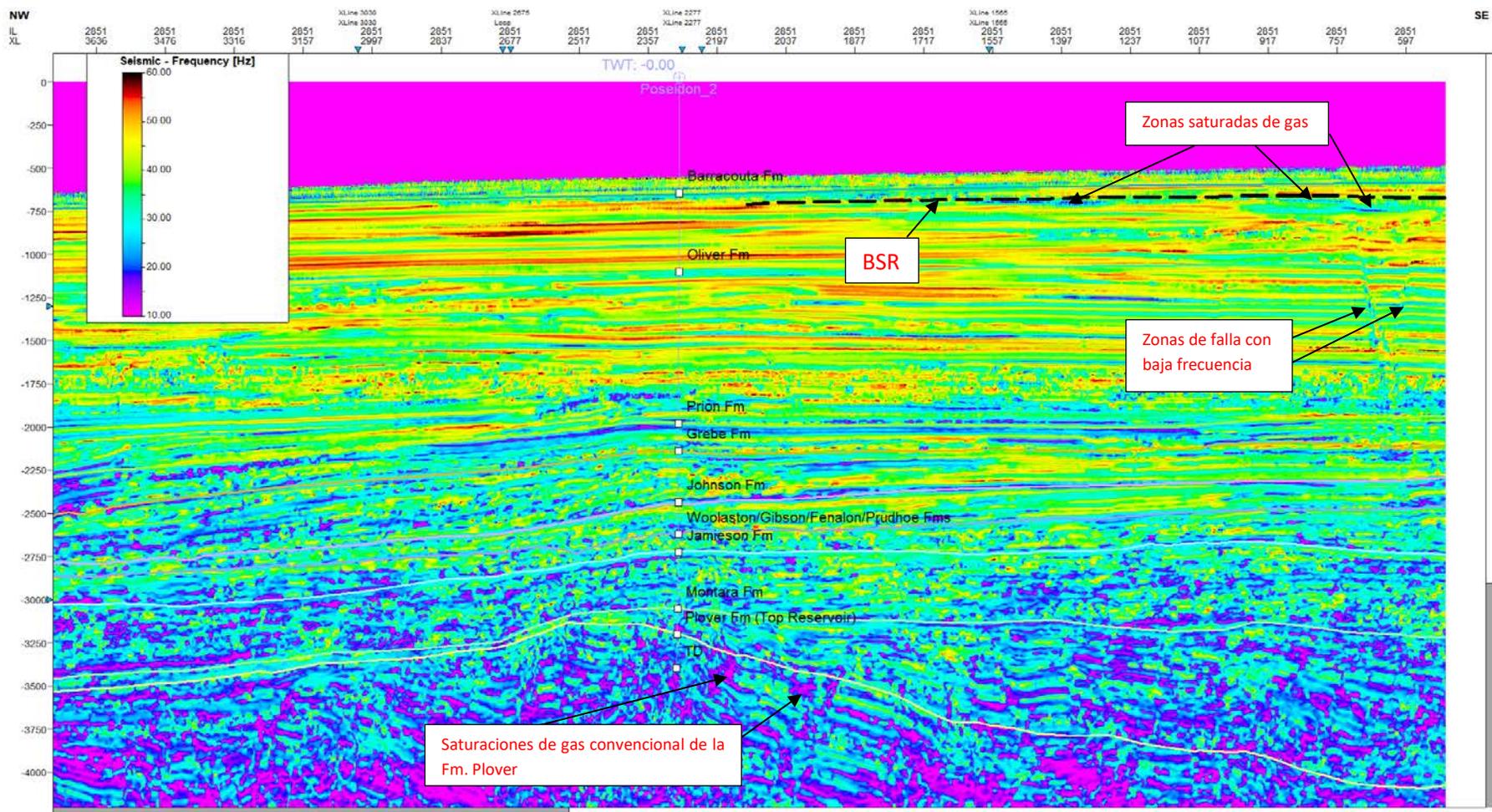
Inline 2851 en sentido NW-SE



Ubicada en el mapa de la Figura 13 bajo el atributo de Coherencia que resalta la continuidad de los reflectores sísmicos, donde las zonas continuas presentan una respuesta blanca y las zonas donde se presentan discontinuidades presentan respuestas de color negro (Chopra et al. 2007).

Figura 20.

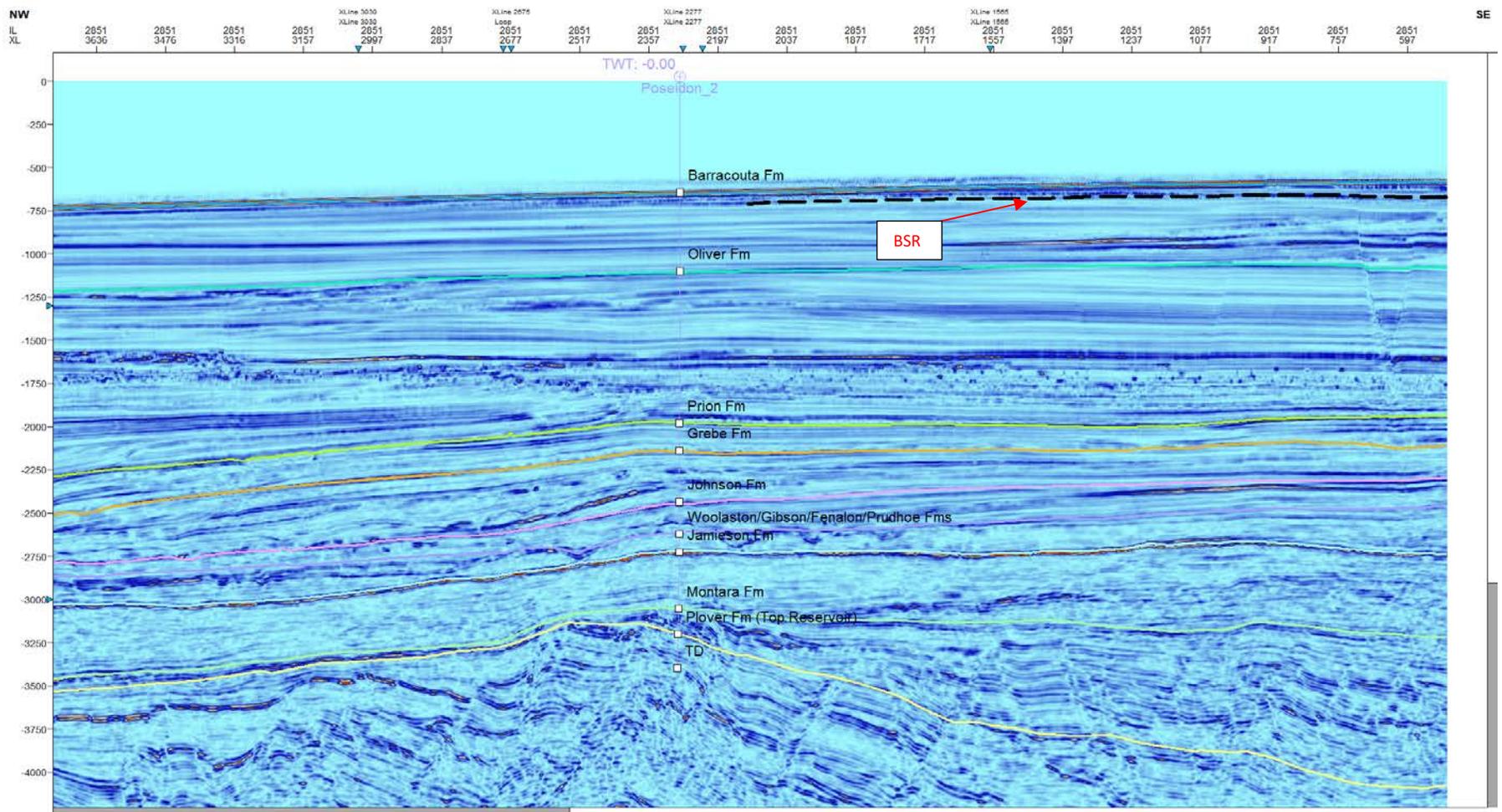
Inline 2851 en dirección NW-SE



Ubicada en el mapa de la Figura 13, que llega hasta los 5000ms en TWT donde se interpretaron los horizontes de 9 formaciones presentes en la zona de estudio, en esta imagen se muestra el atributo de frecuencia instantánea en el cual se observa que la zona correspondiente a la Fm. Plover se encuentra en la banda de baja frecuencia (10-30 Hz) lo cual se puede atribuir a saturación de gas, esta formación es el reservorio convencional de gas más prominente del área de estudio. También se puede observar zonas de baja frecuencia en las formaciones suprayacentes, aunque no tan prominentes lo cual podría indicar migración del hidrocarburo proveniente de la Fm. Plover por zonas de fractura presentes en el área. De igual forma se puede identificar un BSR principal a 710ms de TWT, justamente debajo del BSR se observan zonas de bajas frecuencia las cuales se consideran como zonas saturadas de gas para este estudio. Adicionalmente se puede observar que las zonas de falla previamente identificadas con el atributo de coherencia presentan bajas frecuencias, esto se debe a la saturación de gas de estas como conducto de migración del hidrocarburo desde zonas más profundas (Coffin et al. 2014, 2015).

Figura 21.

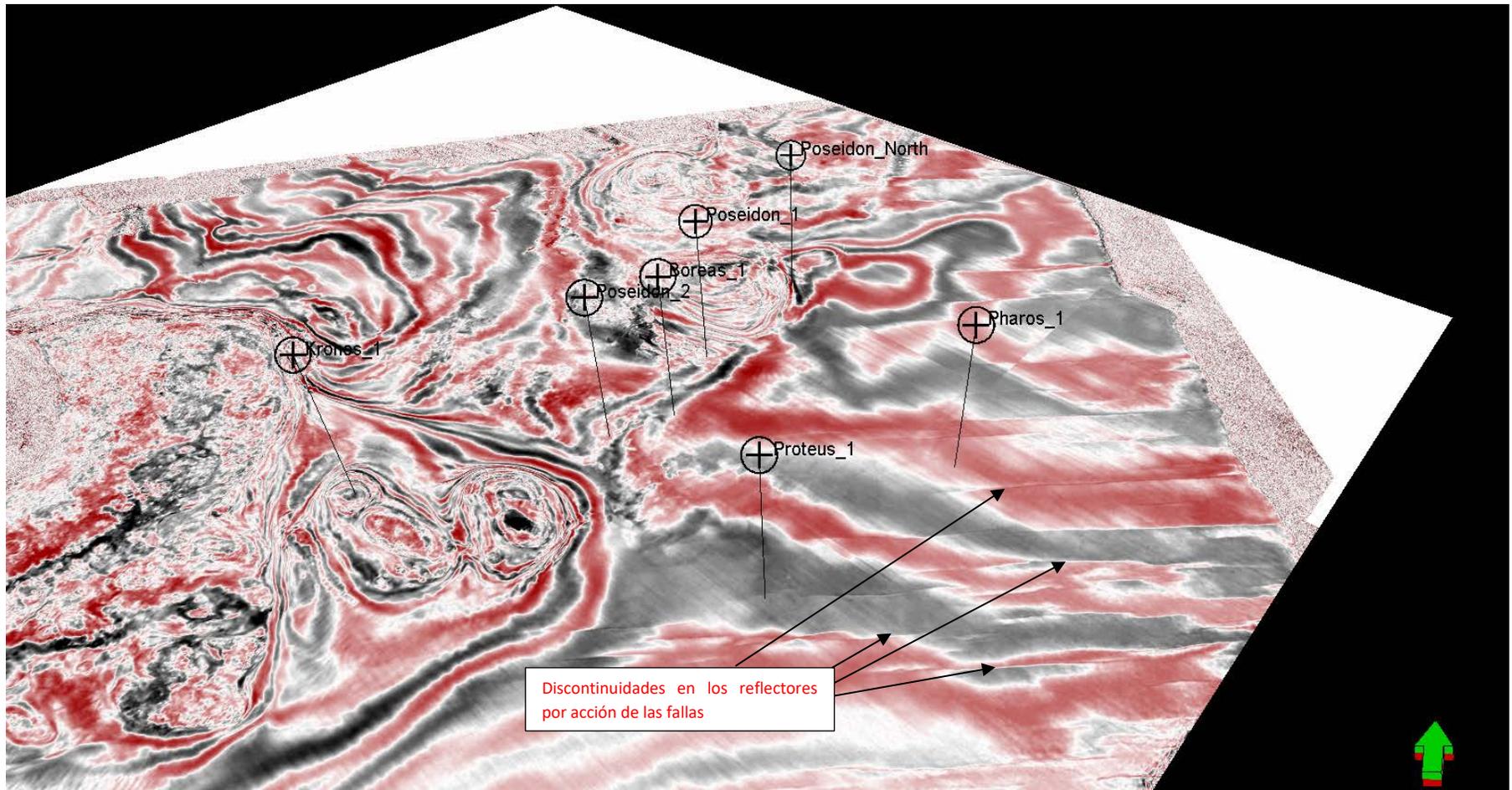
Inline 2851 bajo el atributo de Energía de reflexión



Donde se identifica la presencia de un BSR principal.

Figura 22.

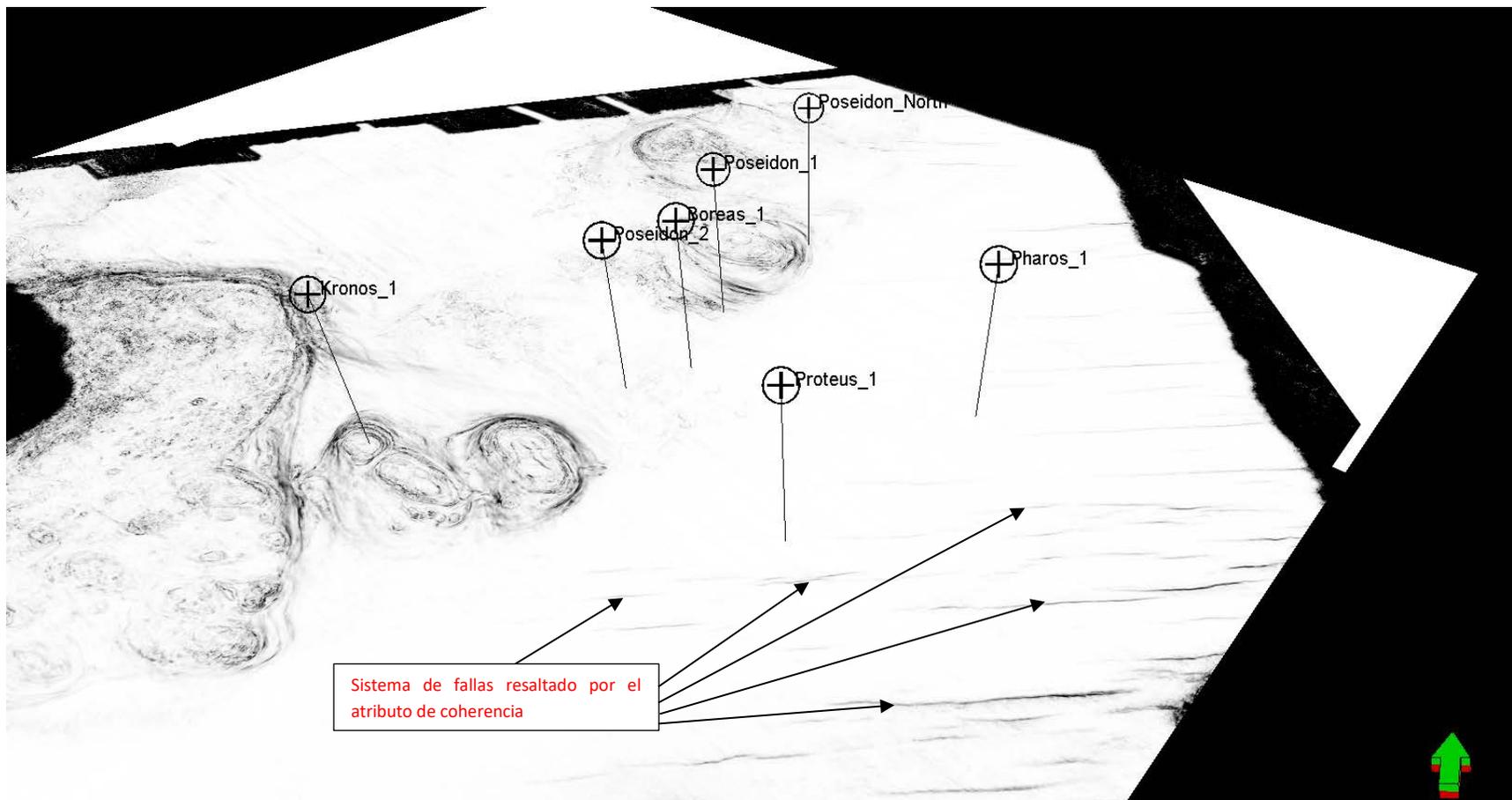
Time slice con  $z=1300\text{ms}$  sin atributos



Donde se observan discontinuidades producto de los sistemas de falla de la zona.

Figura 23.

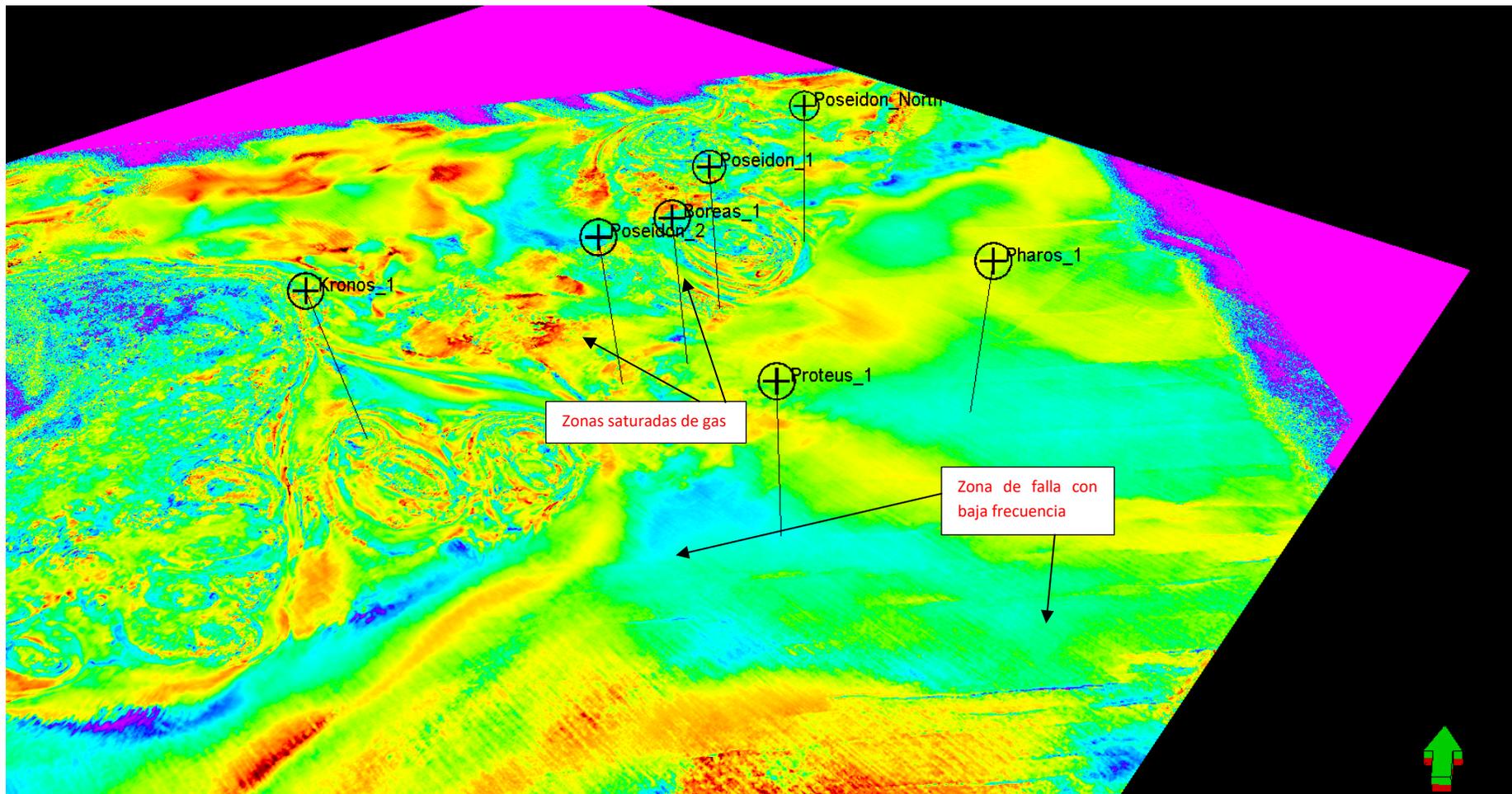
Time slice con z=1300ms bajo el atributo de Coherencia



Donde se resaltan las fallas presentes en la zona de trabajo.

Figura 24.

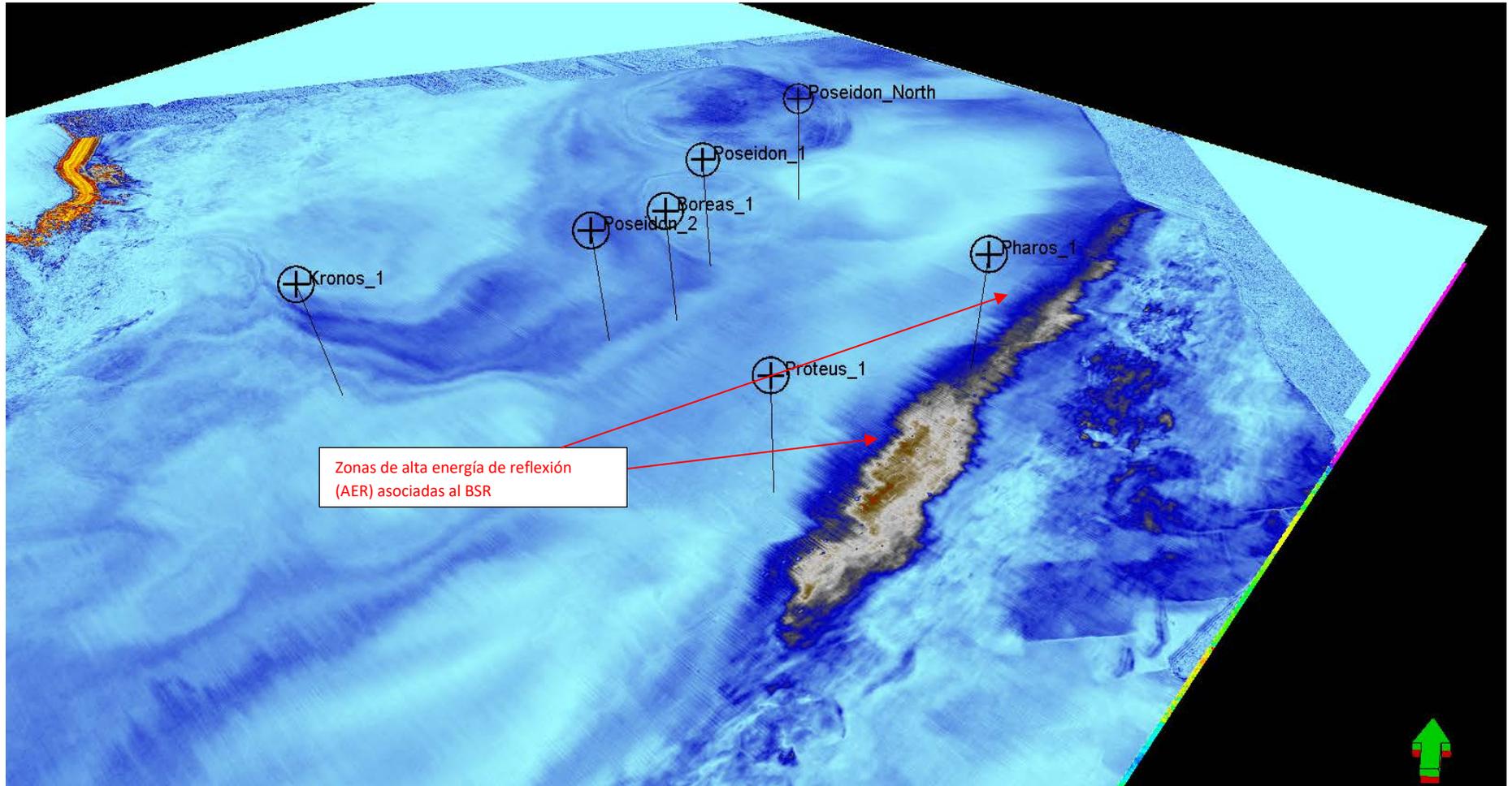
Time slice con z=1300ms bajo el atributo de Frecuencia Instantánea



Donde se resalta las zonas de baja frecuencia atribuidas a saturación de gas y también se observa las zonas de falla con baja frecuencia las cuales sirven de conducto para el transporte del hidrocarburo.

Figura 25.

Time slice con  $z=710\text{ms}$  bajo el atributo de Energía de reflexión



Donde se resalta las zonas de alta energía de reflexión (AER) asociadas a la presencia del BSR. La zona de alta energía tiene una extensión limitada en el time slice puesto que esta es el intersección de una superficie en tiempo horizontal con el BSR, el cual se va profundizando en sentido SE-NW.

Figura 26.

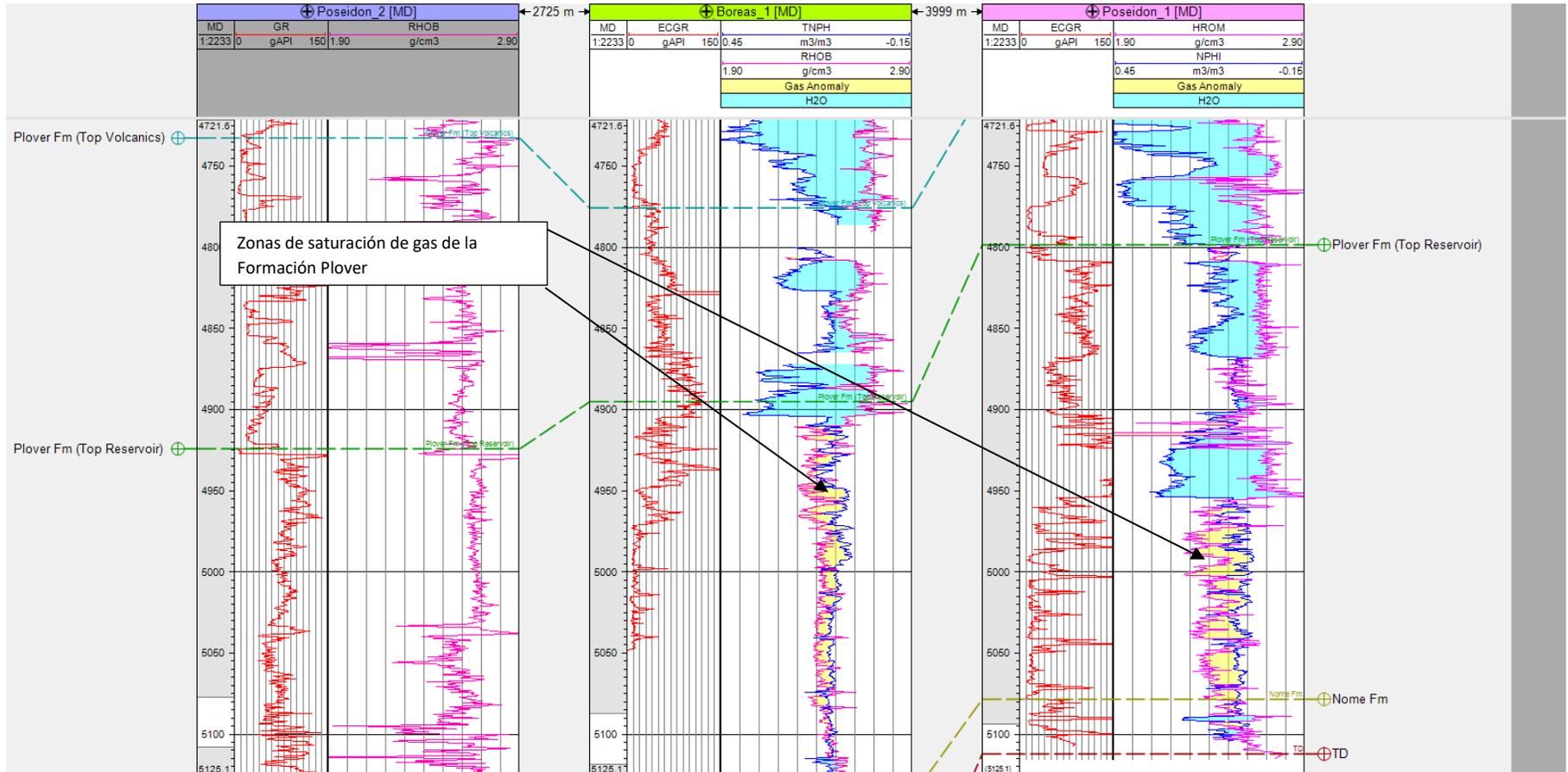
Ubicación de los pozos del bloque Poseidon 3D



Utilizados para realizar la cross section SW-NE realizada con los pozos Poseidon-2, Boreas-1 y Poseidon-1.

Figura 27.

Cross section realizada con los pozos Poseidon-2, Boreas-1 y Poseidon-1.



Se puede observar que mediante el uso de la densidad volumétrica y la porosidad neutrón se identifican las zonas saturadas con gas de la Formación Plover. Cabe resaltar que no existen registros de pozo a profundidades inferiores a los 4000m, por consiguiente, no se cuenta con información petrofísica que nos permita resaltar la presencia de gas libre debajo del BSR.

Figura 28.

Historia de subsidencia de la zona de estudio con datos del pozo Poseidon-1.

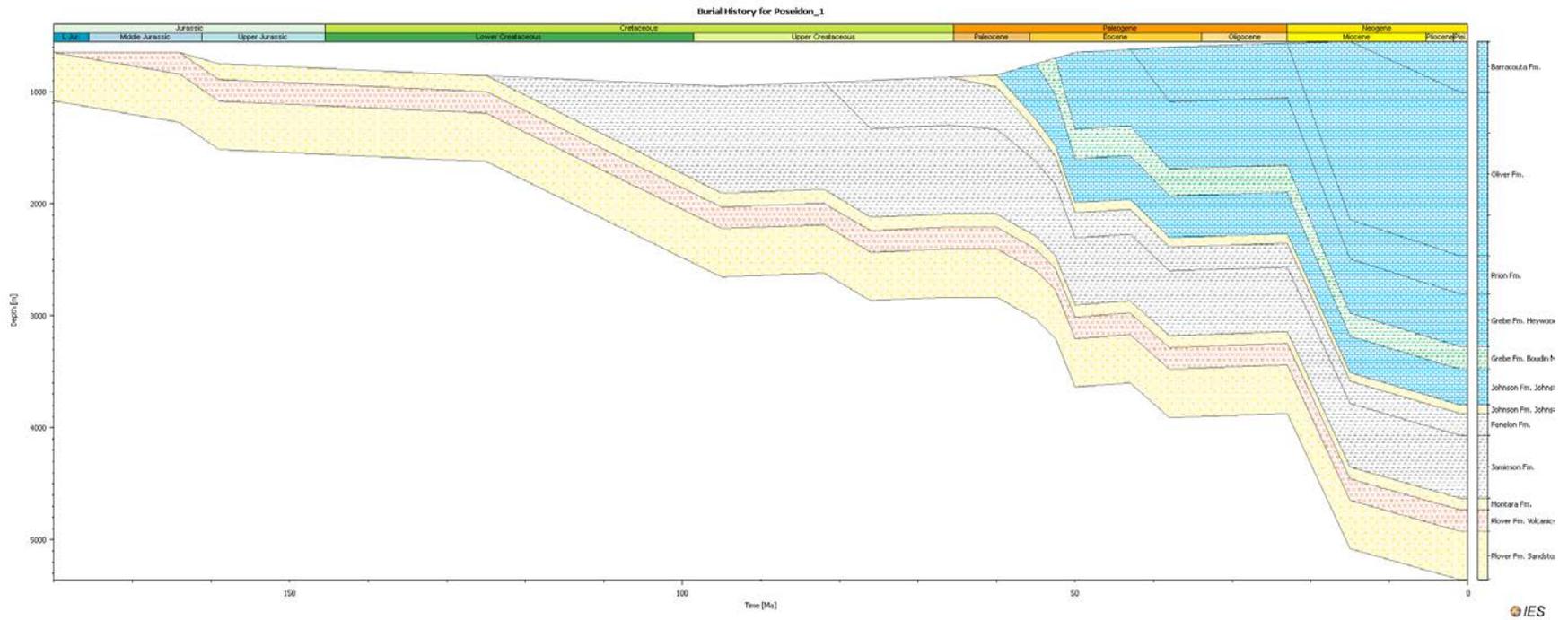
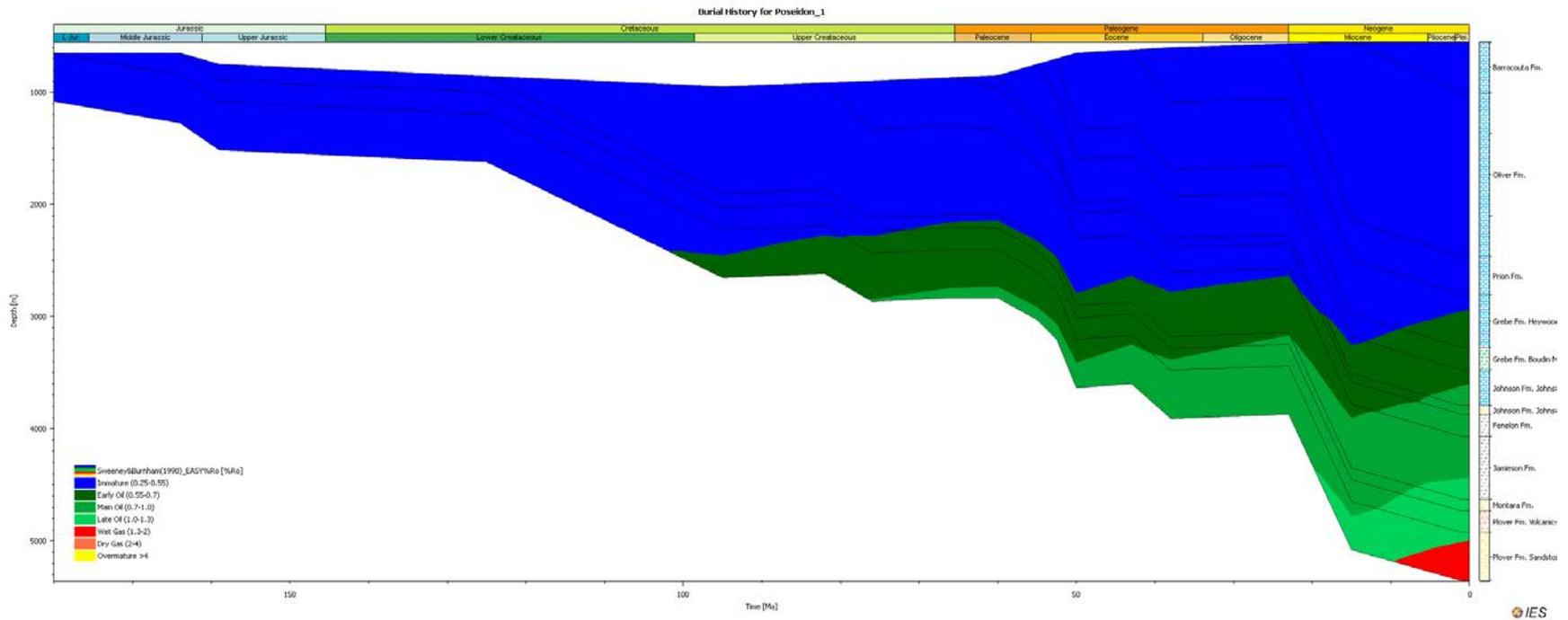


Figura 29.

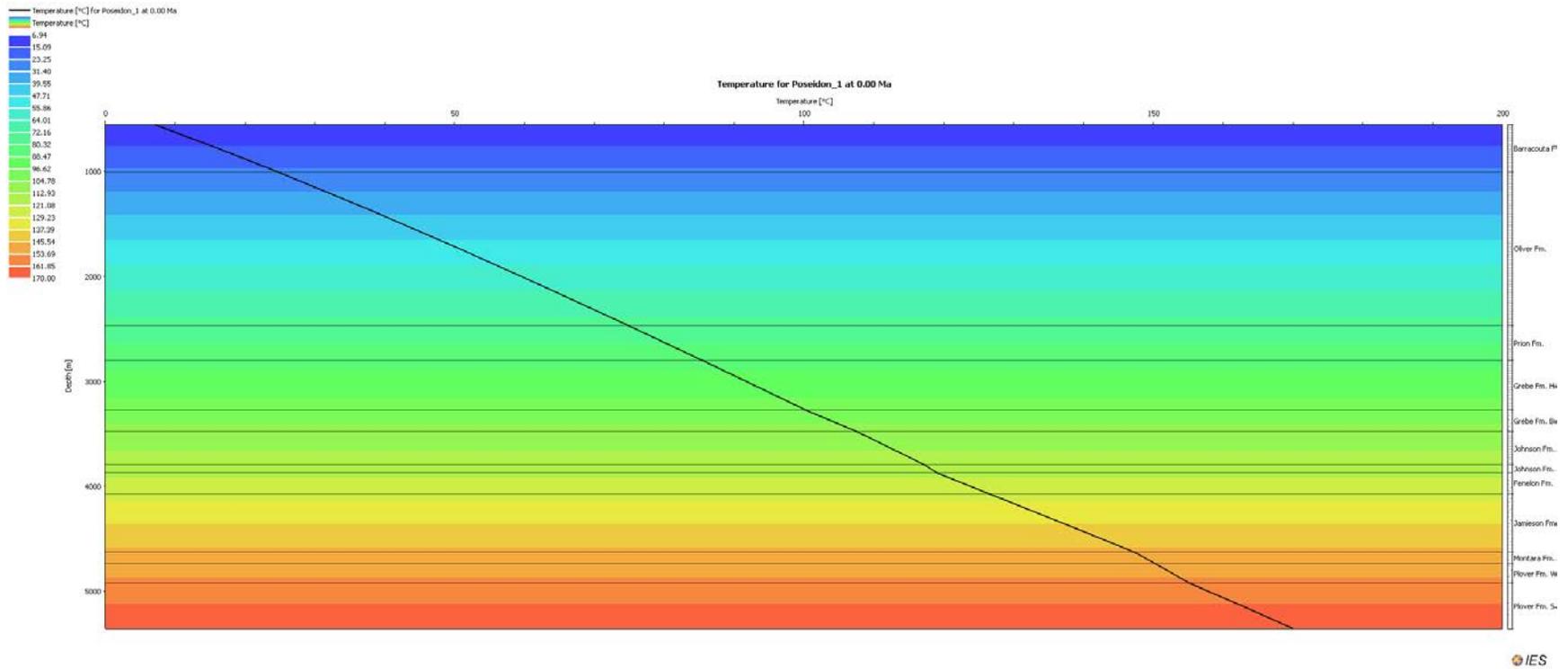
Historia de subsidencia de la zona de estudio con el modelo de madurez termal



Donde se observa el potencial de la Fm. Plover de generación de gas.

Figura 30.

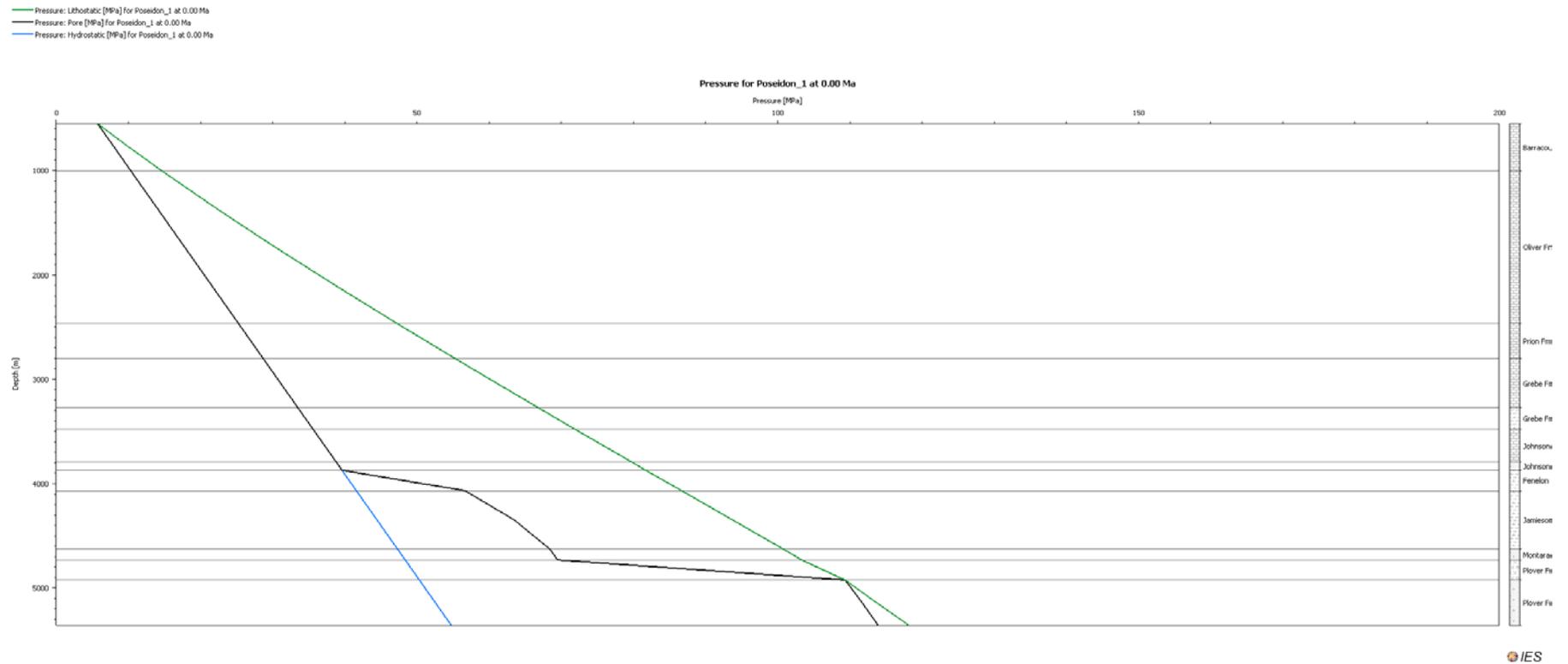
Modelo de temperatura de la zona de estudio



Donde se observa que los datos de temperatura de fondo marino concuerdan con los datos tomados del National Oceanic and Atmospheric Administration NOAA.

Figura 31.

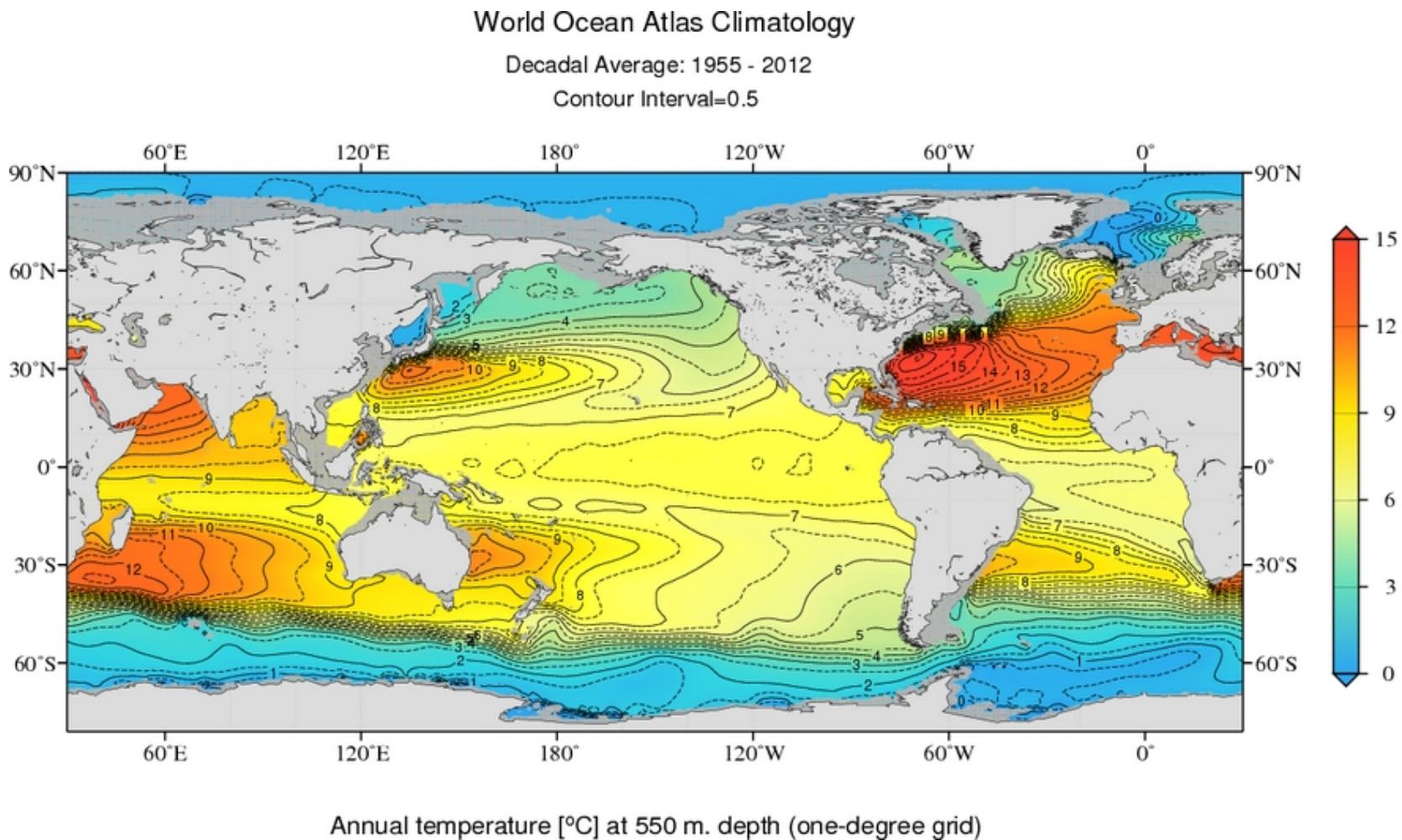
Modelo de presión litostatica (línea verde), hidrostática (línea azul) y presión de poro (línea negra) de la zona de estudio.



Cabe resaltar que el algoritmo de cálculo de Petromod 2012 no contempla la formación de hidratos de metano, por lo cual, no se van a ver reflejados los cambios de presión en las profundidades someras.

Figura 32.

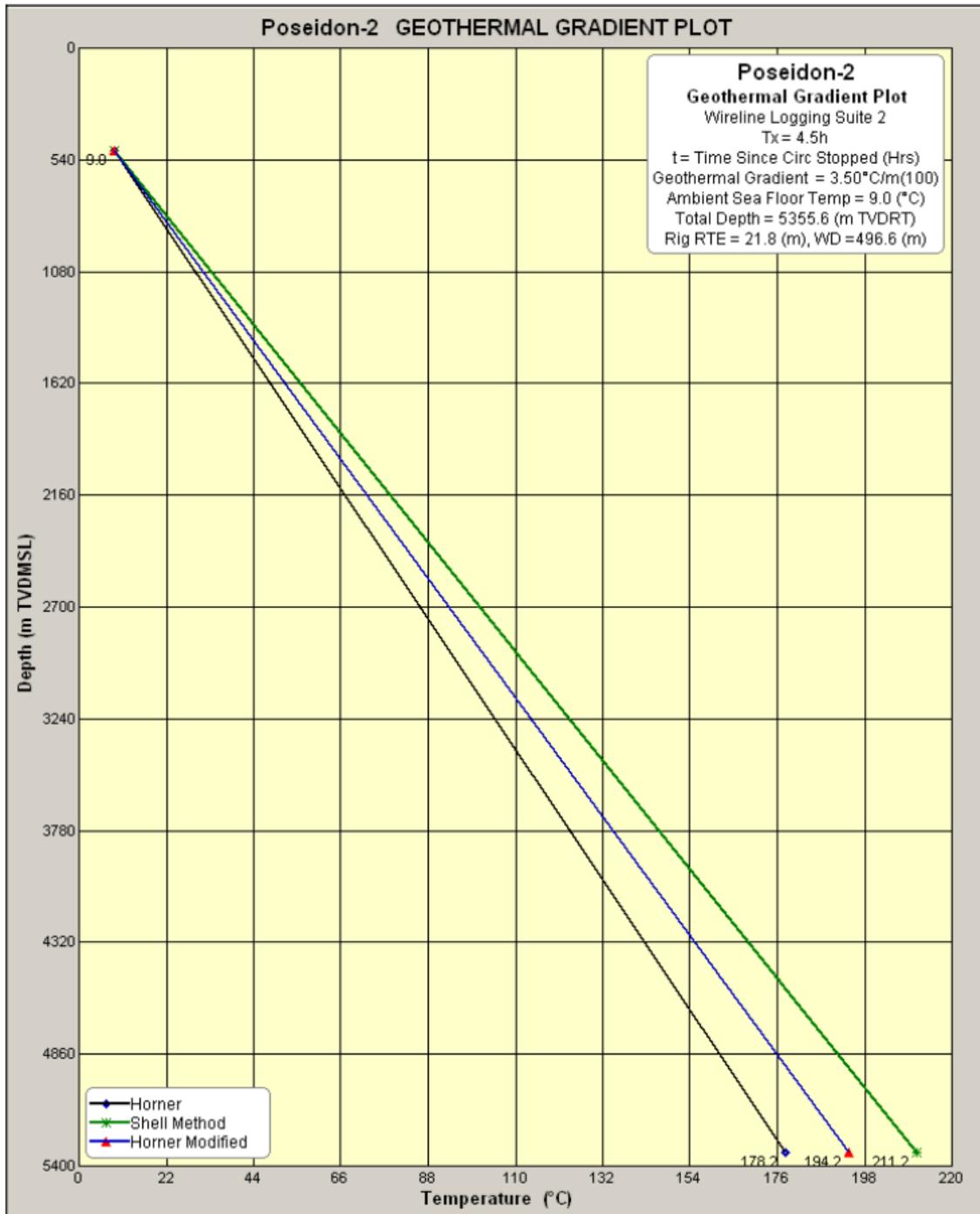
*Mapa de temperaturas del océano a 550m de profundidad*



Donde se observa para la zona de estudio temperaturas entre los 7-8 grados centígrados, consistente con los datos de SWIT del modelo geoquímico 1D. Tomado del National Oceanic and Atmospheric Administration NOAA.

Figura 33.

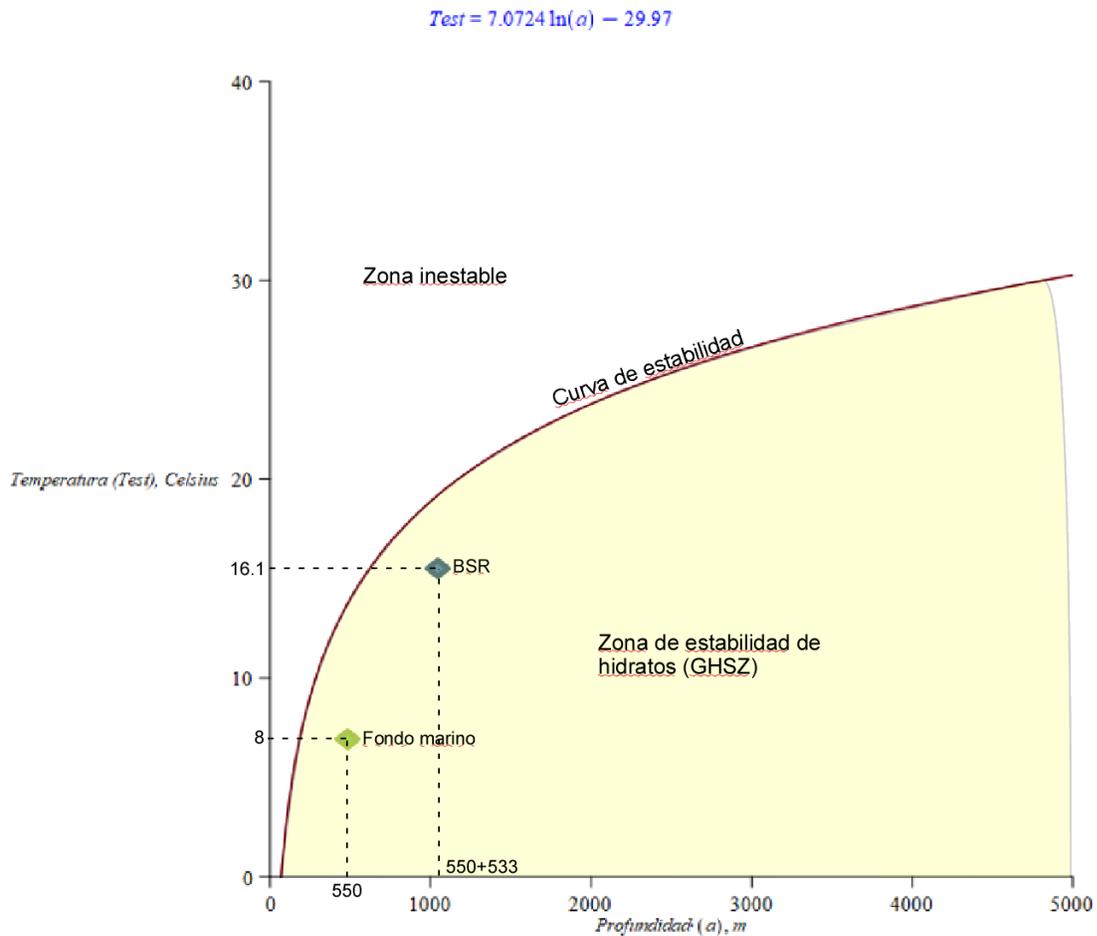
Diagrama de gradiente geotérmico para la zona de estudio tomado del pozo Poseidon-2.



Tomado del Well Completion Report (WCR) del pozo Poseidon-2. El gradiente promedio de esta grafica es consistente con el gradiente calculado en este trabajo que se ilustra en la figura 30.

Figura 34.

*Curva de equilibrio de fase de los hidratos de metano para la zona de estudio*



donde el eje Y representa la temperatura en grados Celsius y el eje X representa la profundidad total que es la suma de la columna de agua y la profundidad del BSR por debajo del fondo marino. El diamante azul representa las condiciones del BSR en temperatura y profundidad y el diamante verde representa las condiciones de estabilidad del hidrato de metano en el fondo marino. Por medio de estos cálculos se obtuvo una temperatura de 16.1 grados Celsius para la profundidad del

BSR, esta temperatura entraría dentro de la curva de estabilidad de hidratos de metano lo cual nos indica que efectivamente en la zona existen las condiciones para la formación de hidratos.

## 7. Discusión de Resultados

Una vez aplicados los atributos sísmicos a las inlines, xlines y time slices seleccionadas se pudo identificar la presencia del BSR en la zona de estudio a aprox. 710 ms de velocidad de tiempo doble (TWT) por debajo del fondo marino, también se observaron zonas de bajas frecuencia por debajo de este nivel, estos niveles son atribuidos a acumulaciones de hidrocarburo en forma de gas el cual es caracterizado por zonas de baja frecuencia inferiores a los 30 Hz como se observa claramente en las figuras 15 y 20. Adicionalmente la identificación del BSR también fue corroborada por el atributo de energía, mediante el cual se observaron zonas de alta energía de reflexión (AER) asociadas al BSR (ver Figuras 16-21-25). La zona donde encuentra el BSR posee una buena resolución vertical sísmica, donde una vez realizado el cálculo correspondiente utilizando la frecuencia máxima del intervalo de interés junto con datos de velocidad obtenidos del *checkshot* del pozo Poseidon-2, se obtuvo un  $\lambda/4 = 10.04m$

Mediante el uso del atributo de coherencia se pudo identificar zonas de fractura y falla presentes en el área de estudio, estas zonas también presentan bajas frecuencias por debajo de los 30 Hz que se observan con el atributo de frecuencia instantánea, en el presente estudio se considera que el sistema de fallas subverticales que se observan en los perfiles sísmicos de las figuras 14 a 19 comprueban que estas fallas constituyen las vías de migración del gas termogénico originado en la Formación Plover hacia las zonas someras de la Formación Barracoute donde se han formado zonas estables de hidratos de metano (ver Figuras 15-20-14).

Este fenómeno de migración de gas profundo y posterior formación de hidratos de gas está documentada por Coffin *et al.*, 2013, 2014 y 2015 para zonas de *offshore* en Nueva Zelanda, Alaska y el Golfo de México. No obstante, Coffin considera que el origen del gas es biogénico

mientras que García González *et al.*, (2019) propone la migración de gas termogénico profundo para explicar la formación de hidratos de gas. Por esta razón es completamente posible que este mismo fenómeno esté ocurriendo en la zona de estudio siendo esto lo propuesto en la hipótesis de trabajo. La presencia de gas termogénico no excluye la presencia de gas biogénico, pero en el desarrollo de este trabajo, la información geoquímica, estratigráfica y sedimentológica no permite soportar la generación de gas biogénico en las zonas someras.

Adicionalmente por medio del análisis de una *cross section* elaborada con registros de pozo de porosidad neutrón y densidad volumétrica para los pozos Poseidon-2, Boreas-1 y Poseidon-1 en sentido SW-NE se pudo evidenciar la saturación de gas convencional de la Formación Plover, esta acumulación de gas en conjunto con el fallamiento que presenta la zona nos da un indicio de que este hidrocarburo puede estar migrando hacia zonas más someras. (ver Figuras 26 y 27).

El modelo de madurez termal revela que la Fm. Plover se encuentra en ventana de generación de gas termogénico con un buen potencial de generación (ver Figura 29). Una discusión adicional sobre el tipo u origen del gas que forma los hidratos de metano puede surgir y es considerar la presencia de gas biogénico pero esta hipótesis fue descartada debido a que no existen datos contundentes que corroboren esta premisa, a diferencia de los datos presentes en los WCR utilizados para el modelo que dan como resultado a la Fm. Plover en ventana de generación de gas termogénico. Este modelo se calibro en temperatura con respecto a los datos de temperatura de fondo marino provistos por el *National Oceanic and Atmospheric Administration NOAA* que oscilan entre 7-8 grados Celsius para una profundidad de 550m de columna de agua siendo estas las condiciones actuales de la zona de estudio. (ver Figura 30).

El modelo también nos da información sobre gradientes de presión hidrostática, litostática y de presión de poro (ver Figura 31.) los cuales fueron empleados para los cálculos y elaboración del diagrama de estabilidad de hidratos de metano para la zona de estudio.

Finalmente se elaboró un diagrama de estabilidad de los hidratos de metano tomando como base la metodología propuesta por Wang *et al* 2006 donde se tomaron los datos de gradiente geotérmico de la zona provistos por el WCR del pozo Poseidon-2 (ver Figura 35.) junto con datos de profundidad de la columna de agua y profundidad del BSR por medio de las fórmulas:

$$(1) T_{sed} = G * \frac{A}{1000} + 373.41 * B^{-0.6269}$$

$$(2) T_{est} = 7.0724 * \ln(D) - 29.970$$

Donde para la formula (1) se calculó la temperatura de los sedimentos a una profundidad específica, G es el gradiente geotérmico, A es la profundidad de la zona de interés por debajo del fondo marino, siendo en este caso la profundidad del BSR (533m) y B es la profundidad de la columna de agua que para el caso de la zona de estudio es de 550 m. Para la formula (2) donde se expresa la relación de la temperatura de estabilidad de los hidratos (Test) con la profundidad (D) para poder mostrar la curva de estabilidad de fase de los hidratos (ver Figura 34). Como resultado de estos cálculos se obtuvo una temperatura de 16.1 grados Celsius para la profundidad del BSR, esta temperatura entraría dentro de la curva de estabilidad de hidratos de metano lo cual nos indica que efectivamente en la zona existen las condiciones para la formación de una zona de estabilidad de hidratos de metano en la Formación Barracoute a 533m de profundidad a partir del fondo marino. Donde se dan las condiciones de presión y temperatura para que los hidratos de gas se hayan formado durante el proceso de migración y entrapamiento. Así mismo la Figura 34 provee

información del espesor de la zona de estabilidad de los hidratos de metano la cual es de 533m a partir del fondo marino.

La unión de los análisis geofísicos de atributos sísmicos, interpretación sísmica, análisis petrofísicos de registros de pozo de porosidad neutrón y densidad volumétrica por medio de *cross section*, modelado geoquímico 1D y cálculo de diagramas de estabilidad de hidratos de metano muestran como resultado final la presencia de una zona de estabilidad de hidratos de metano de 533m de espesor que actúa como sello para los gases termogénicos provenientes de zonas profundas formando un reservorio de gas por debajo del BSR, de acuerdo con los trabajos expuestos por Skorobogatov *et al.*, (1998) y Collett *et al.*, (2011).

## 8. Conclusiones

Luego de la investigación sobre los atributos sísmicos que mejor identificaran la saturación de gas y características estructurales en unidades litoestratigráficas se escogieron los atributos de frecuencia instantánea, energía y coherencia para el análisis del bloque Poseidón 3D. Por medio de los atributos de frecuencia instantánea y energía se evidencio la existencia del BSR en la zona de estudio en una profundidad equivalente cercana a los 710 ms de *two way time* (TWT) en la sísmica. La existencia de capas saturadas de gas por debajo del BSR indica que los hidratos de gas actúan como sello para evitar que el gas siga migrando hacia la superficie, esta situación corrobora la hipótesis presentada en este trabajo.

Mediante el atributo de frecuencia instantánea también se pudo identificar las zonas de baja frecuencia inferiores a 30 Hz atribuidas a saturación de gas presentes tanto en las zonas profundas como en las áreas someras por debajo del BSR como se ve claramente en las figuras 15 y 20, estas zonas someras saturadas de gas presentan un potencial energético de interés, pero también representan *geo hazards* por el riesgo de una liberación en grandes cantidades de metano el cual es un gas que causa efecto invernadero.

Mediante el uso del atributo geométrico de coherencia se evidencia la existencia de zonas de falla presentes en la zona las cuales representan los canales de migración del gas termogénico de la Formación Plover en la zona profunda hacia las zonas someras de la Formación Barracoute. Esta interpretación esta también soportada por el atributo de frecuencia instantánea, el cual muestra que estos planos de falla presentan saturación de gas mostradas en las bandas de baja frecuencia inferiores a los 30 Hz.

A través del análisis petrofísico realizado para tres pozos donde se utilizaron los registros de porosidad neutrón y densidad volumétrica de la Formación Plover se muestra la existencia de saturación de gas corroborando lo expuesto en la literatura.

El modelo geoquímico 1D elaborado con datos de pozo indica que la Formación Plover se encuentra en ventana de generación de gas termogénico, el modelo también nos provee de información importante de presión y temperatura para la construcción del diagrama de estabilidad de hidratos de metano. Finalmente, el diagrama de estabilidad de hidratos de metano realizado tomando en cuenta datos de temperatura del fondo marino y gradiente geotérmico revela que nos encontramos dentro de la zona de estabilidad con temperaturas de sedimentos en el rango de los 16 grados Celsius y por consecuente es completamente posible la formación de una zona de estabilidad de hidratos de metano en la zona de estudio, donde el espesor de esta zona de estabilidad va desde el fondo marino hasta los 533m de profundidad coincidiendo con la profundidad del BSR.

### Referencias Bibliográficas

- Ashi, J., Tokuyama, H., Taira, A., 2002. Distribution of methane hydrates BSR sand and its implications for the prism growth in the Nankai Trough. *Marine Geology* 187:77-191.
- Angevine, C.L., Heller, P-L., and Paola, C., 1990, Quantitative sedimentary basin modeling. AAPG continuing education course notes Series No 32. 133pp.
- Chong, Z., Yang, S., Babu, P., Linga, P., Li. X., 2015. Review of natural gas hydrates as an energy resource: Prospects and challenges. Elsevier, Applied Energy.
- Chopra, S., Marfurt, K. 2005. Seismic Attributes – A Historical Perspective. *Geophysics*, Vol. 70, No. 5; P. 3SO – 28SO.
- Chopra, S., Marfurt, K. 2007. Seismic Attribute Prospect Identification and Reservoir Characterization. SEG Geophysical Developments Series; No. 11.
- Coffin, R., Smith, J., Plummer, R., Yoza, B., Larsen, R., Millholland, L., Montgomery, M., 2013. Spatial variation in shallow sediment methane sources and cycling on the Alaskan Beaufort Sea Shelf/Slope. Elsevier, *Marine and Petroleum Geology*.
- Coffin, R., Hamdan, L., Smith, J., Rose, P., Plummer, R., Yoza, B., Pecher, I., Montgomery, M., 2014. Contribution of vertical methane flux to shallow sediment carbon pools across Porangahau Ridge, New Zealand. *Energies*, Vol.7, 5332-5356.

- Coffin, R., Osburn, C., Plummer, R., Smith, J., Rose, P., Grabowski, K., 2015. Deep sediment-sourced methane contribution to shallow sediment organic carbon: Atwater Valley, Texas-Louisiana Shelf, Gulf of Mexico. *Energies*, Vol.8, 1561-1583.
- Collett, T.S., Lee, M.W., Avena, W.F., Miller, J.J., Lewis, K.A., Zyrianova, M.V., Boswell, R. and Inks, T.L., 2011. Permafrost-associated natural gas hydrate occurrences on the Alaska North Slope. *Marine and Petroleum Geology*, 28(2), pp.279-294.
- Domenico, S.N. 1977. Elastic properties of unconsolidated porous sand reservoirs. *Geophysics* 42:1339-1368.
- García-González, M., R. Bernal-Olaya, J.L. Fuentes-Lorenzo and A. M. García-Ceballos, 2019; Mud Diapirs and Mud Volcanoes Associated with Gas Hydrates System in the Sinu Fold Belt of Colombia, South Western Caribbean and its Significant in the Petroleum System. AAPG Asia Pacific Region Geosciences Technology Workshop, Gas Hydrates – From Potential Geohazard to Carbon- Efficient Fuel?, Auckland, New Zealand, April 15-17, 2019. Search and Discovery Article #80698
- Holbrook, S., Hoskins, H., Wood, W., Stephen, R., Lizarralde, D., 1996. Methane Hydrate and Free Gas on the Blake Ridge from Vertical Seismic Profiling. *Science*, Vol. 273, No.27.
- Kennard, J.M., Deighton, I., Ryan, D., Edwards, D.S. and Boreham, C.J., 2004. Subsidence and Thermal history modelling: New insights into hydrocarbon expulsion from multiple

petroleum systems in the Browse Basin. Northern Territory Geological Survey, Special Publication 1, 411-435.

Kvenvolden, K., McMenamin, M.A. 1980. Hydrates of natural gas: a review of their geological occurrences. U.S Geological Survey., Circ, No.825, 11pp.

Kvenvolden, K., 1988. Methane Hydrate – A Mayor Reservoir of Carbon in the Shallow Geosphere? Chemical Geology. 71. 41-51.

Makogon, Y., 2010. Natural gas hydrates – A promising source of energy. Journal of Natural Gas Science and Engineering.

McKenzie, D., 1978. Some Remarks on the Development of Sedimentary Basins. Earth and Planetary Science Letters, Vol.40, 25-32.

Partyka, G., 1998. Seismic Attribute sensitivity to energy, bandwidth, phase and thickness.

Sarhan, M., 2017. The efficiency of seismic attributes to differentiate between massive and non-massive carbonate successions for hydrocarbon exploration activity. NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics.

Satyavani, N., Sain, K., Lall, M., 2008. Seismic attribute study for gas hydrates in the Andaman Offshore India. Marine Geophysical Research, 29,167-175.

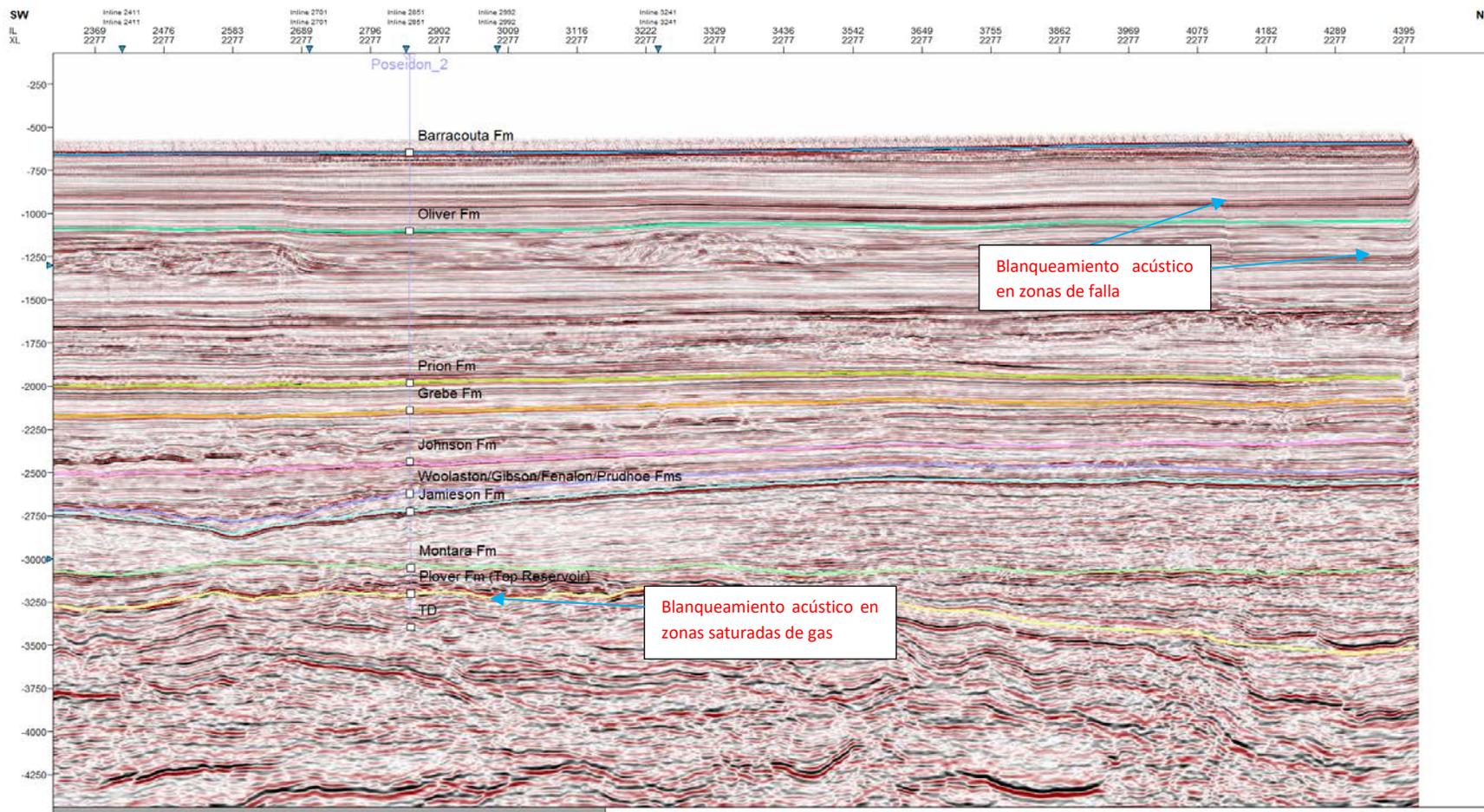
- Skorobogatov, V.A., Yakushev, V.S. and Chuvilin, E.M., 1998. Sources of natural gas within permafrost; North-West Siberia. In Permafrost Proceedings Seventh International Conference, Collection Nordicana (Vol. 57, pp. 1001-1007).
- Taner, M., Sheriff, R. 1977. Application of amplitude, frequency, and other attributes to stratigraphic and hydrocarbon determination. AAPG, Mem. 26. 301-327.
- Taner, M., Koehler, F., Sheriff, R. 1979. Complex Seismic Trace Analysis. Geophysics, 44, 1041–1063.
- Taner, M. 2001. Seismic Attributes. CSEG Recorder, Vol. 26, No.7.
- Tissot, B.P. and Welte, D.H., 1984, Petroleum Formation and Occurrence, (Second Edition), Springer-Verlag, New York, 699 pp.
- Wang, S., Yan, W., Song, H. 2006. Mapping the thickness of the gas hydrate stability zone in the South China Sea. Terr. Atmos. Ocean. Sci, Vol. 17, No. 4, 815-828.
- Warrington, M., Tucker, S., Jonklaas, P. 2011. Poseidon-2 Well Completion Report Volume 2: Interpretive Data. ConocoPhillips (Browse Basin) Pty Ltd.

Wood, WT., Ruppel, C. 2000. Seismic investigations of the Blake Ridge gas hydrate area: a synthesis. In: Paull, CK. et al. Proceedings of the ocean drilling program, scientific results, vol.164. pp 253-264.

Yuan, F., Bennell, J.D., Davis, A.M. 1992. Acoustic and physical characteristics of gassy sediments in the western Irish Sea. Continental Shelf Research, Elsevier, Vol.12, No.10, 1121-1134

Apéndice A.

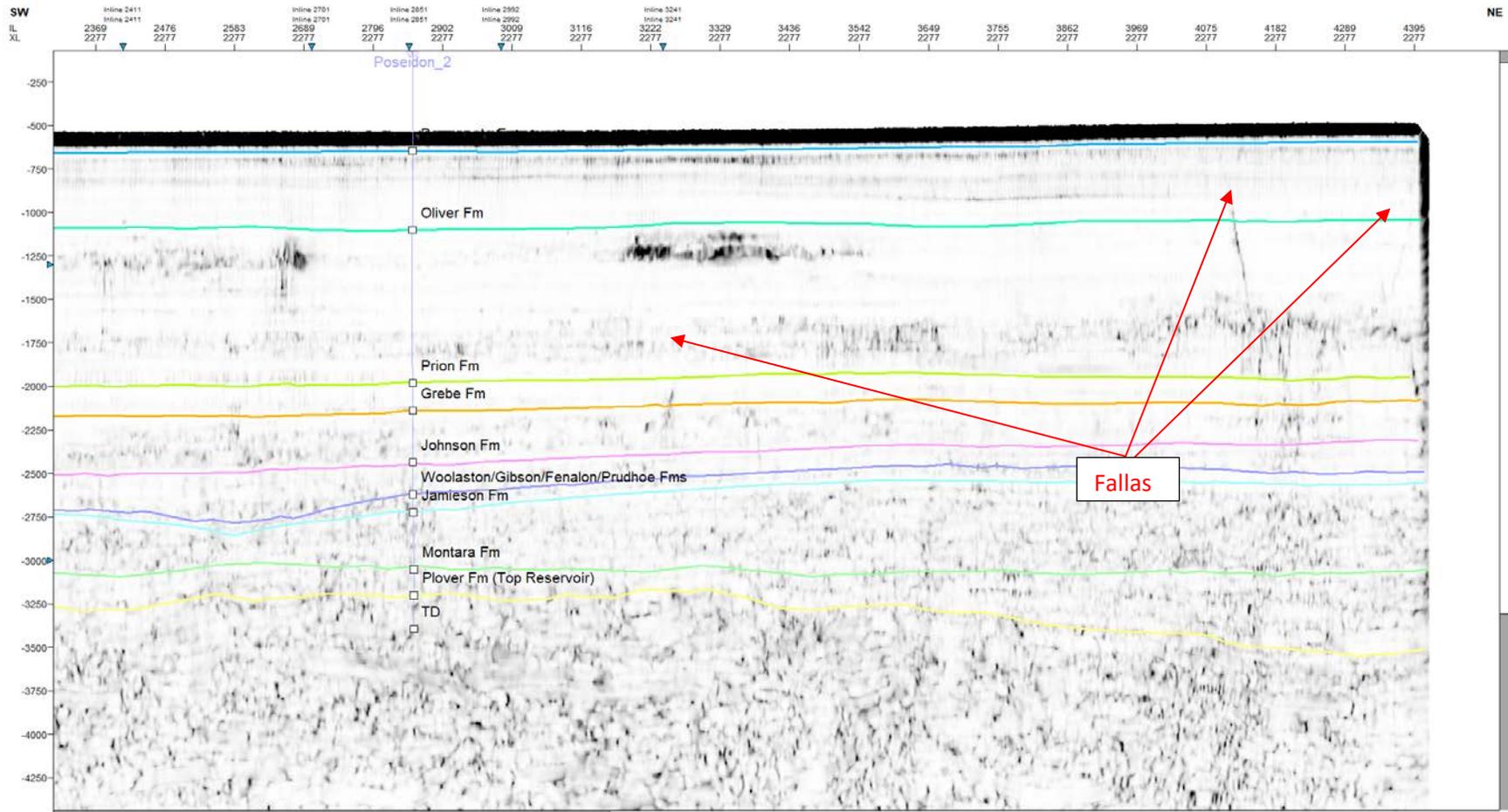
*Xline 2277 sin atributos sísmicos*



Con presencia de blanqueamiento acústico asociado a la presencia de gas y a las zonas de falla.

Apéndice B.

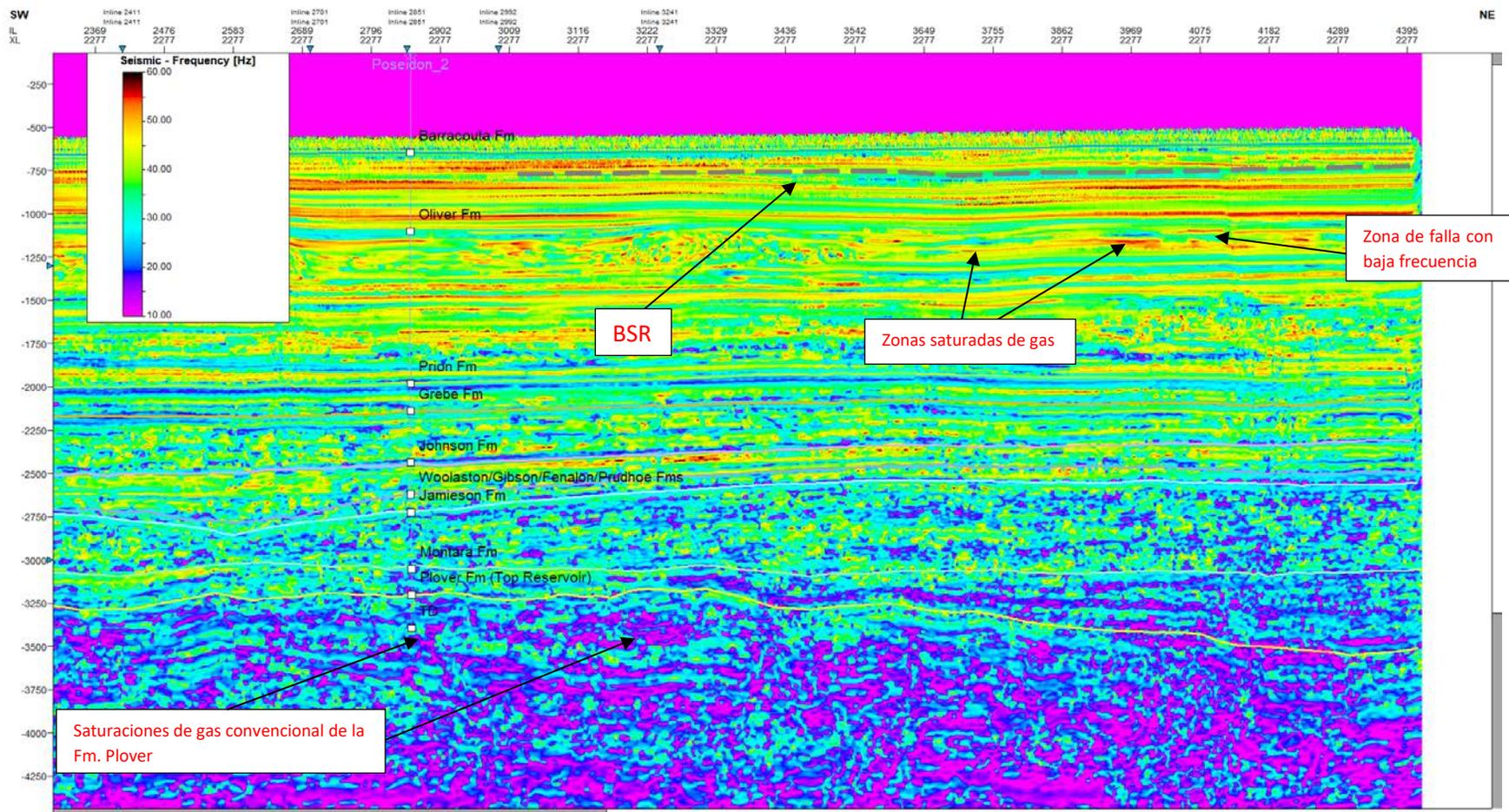
*Xline 2277 bajo el atributo de Coherencia*



*Donde se resaltan las fallas presentes en la zona de trabajo.*

Apéndice C.

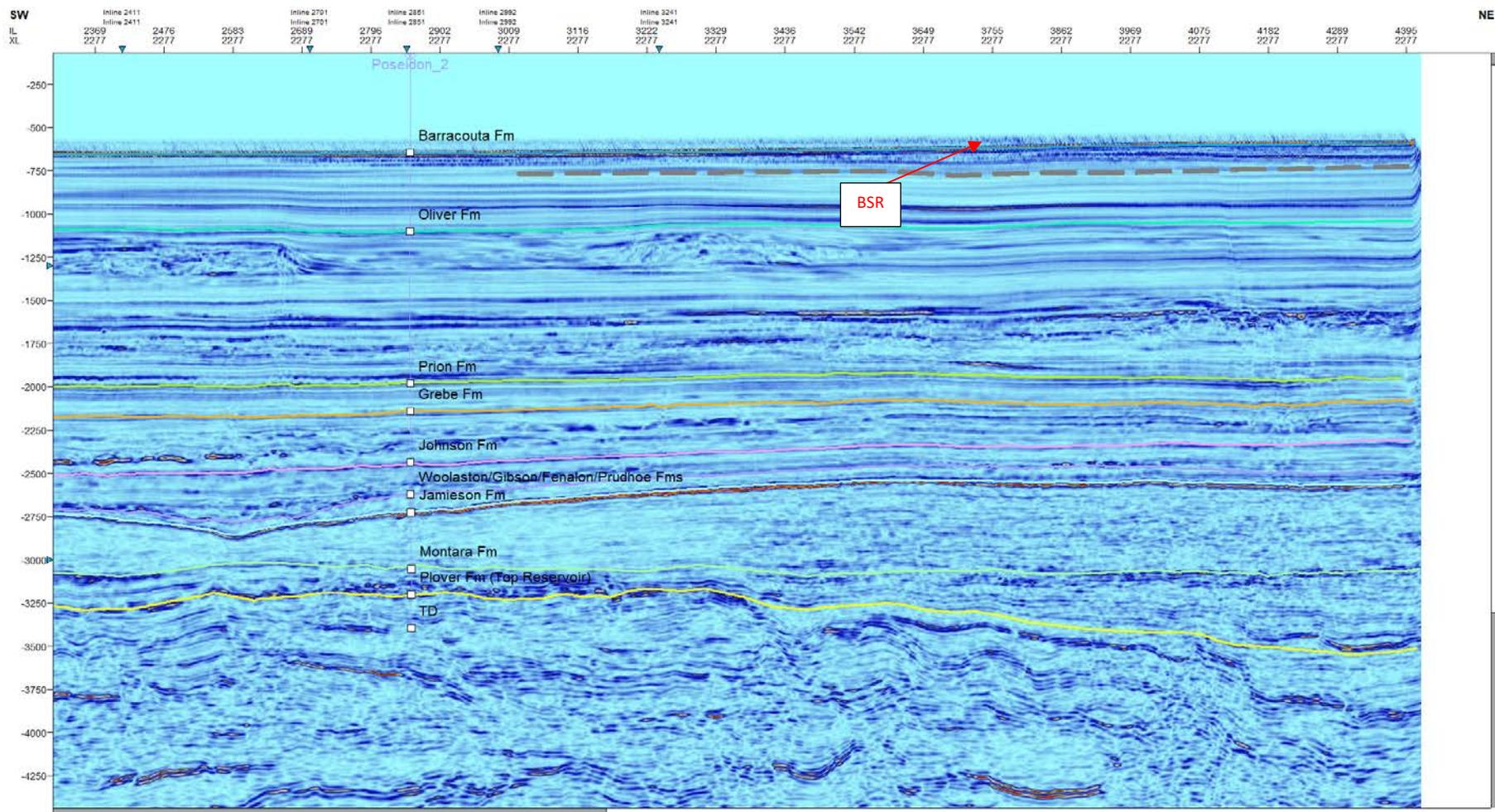
*Xline 2277 bajo el atributo de Frecuencia Instantánea*



Donde se resalta el BSR, las zonas de baja frecuencia atribuidas a saturación de gas y también se observa las zonas de falla con baja frecuencia las cuales sirven de conducto para el transporte del hidrocarburo.

Apéndice D.

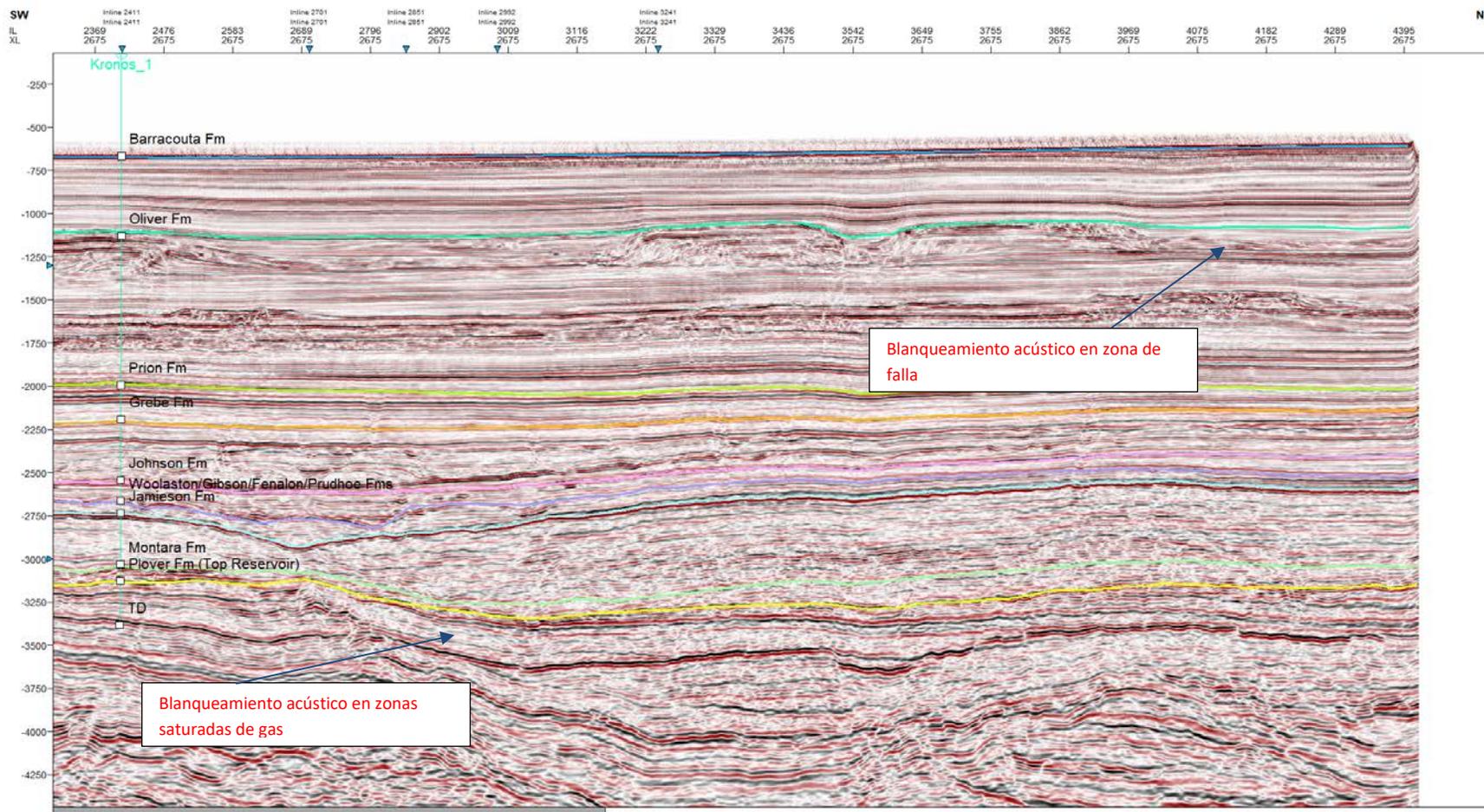
*Xline 2277 bajo el atributo de Energía de reflexión*



Donde se resalta las zonas de alta energía de reflexión (AER) asociadas a la presencia del BSR.

Apéndice E.

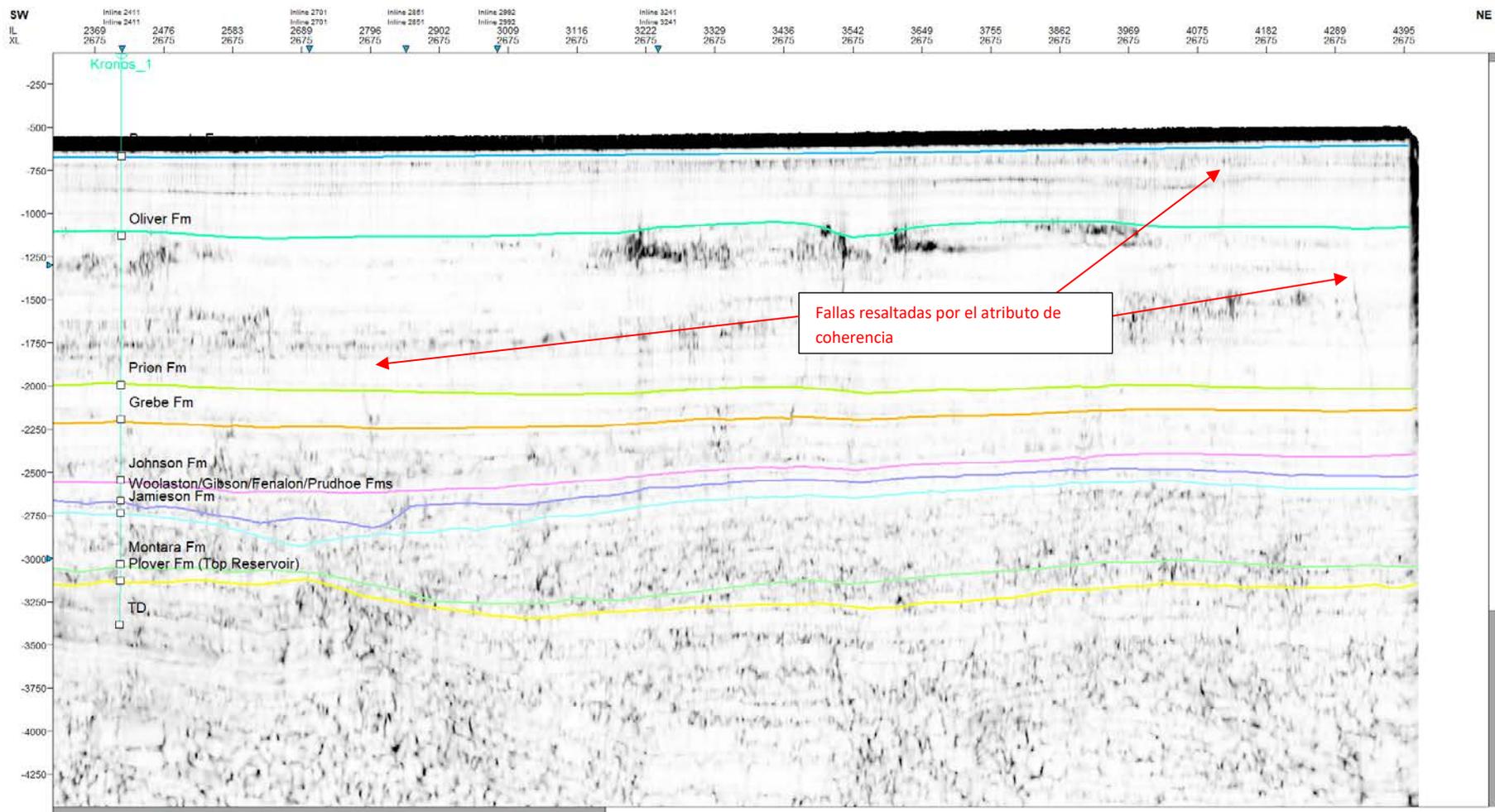
Xline 2675 sin atributos sísmicos



Donde se evidencia blanqueamiento acústico en las zonas de falla y zonas saturadas de gas. Tomado de autor.

Apéndice F.

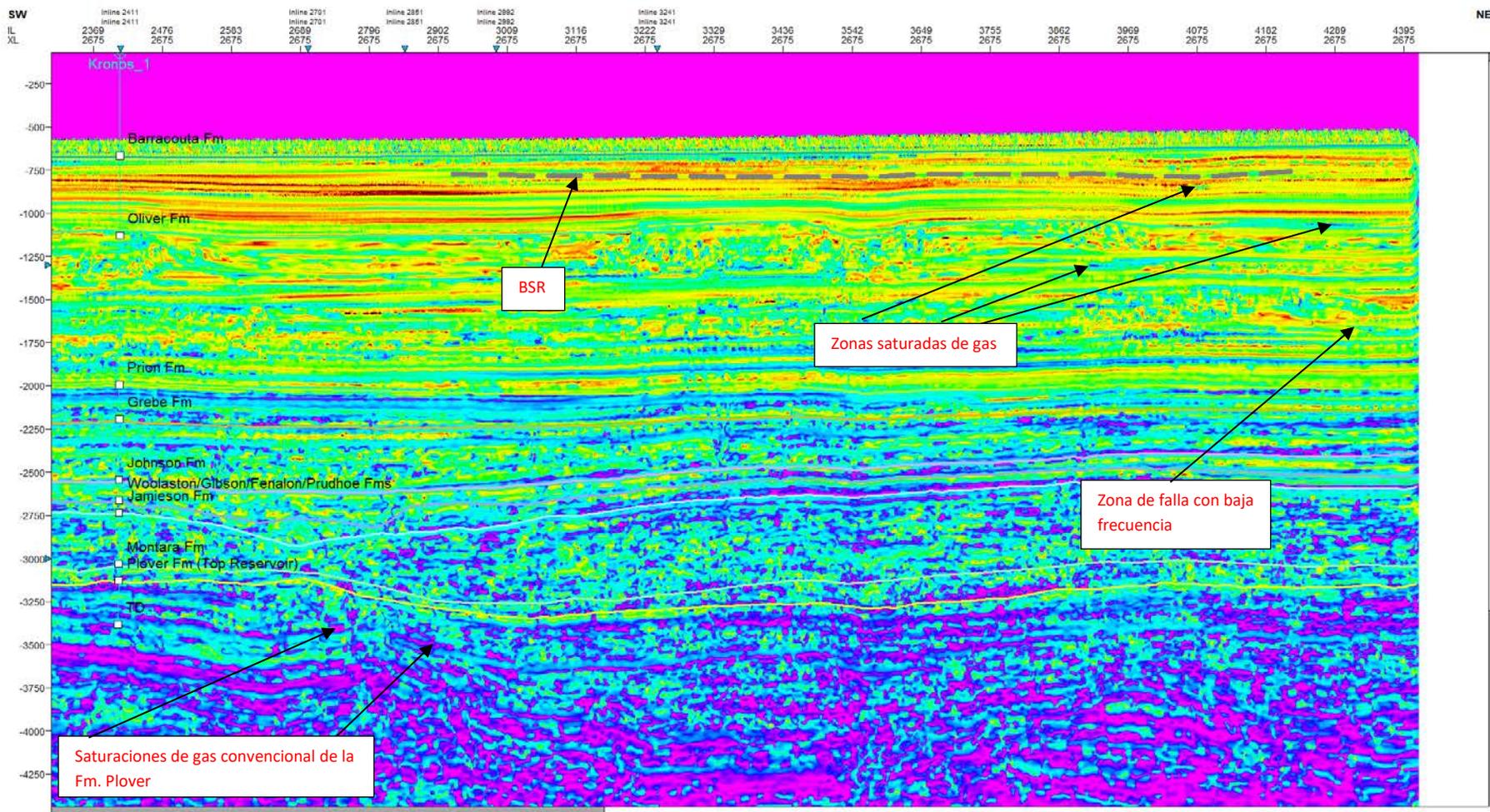
*Xline 2675 bajo el atributo de Coherencia*



Donde se resaltan las fallas presentes en la zona de trabajo.

Apéndice G.

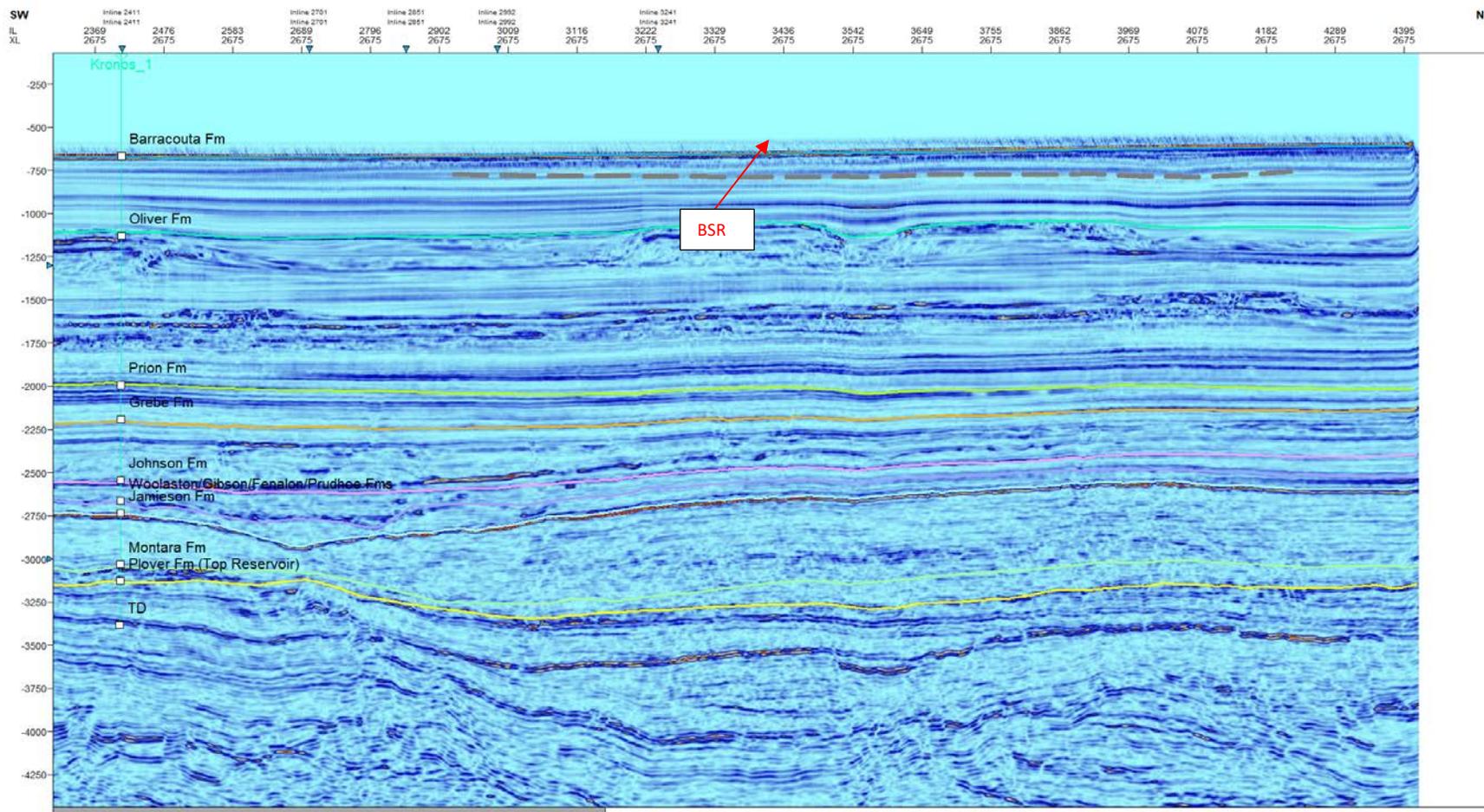
*Xline 2675 bajo el atributo de Frecuencia Instantánea*



Donde se resalta el BSR, las zonas de baja frecuencia atribuidas a saturación de gas y también se observa las zonas de falla con baja frecuencia las cuales sirven de conducto para el transporte del hidrocarburo.

Apéndice H.

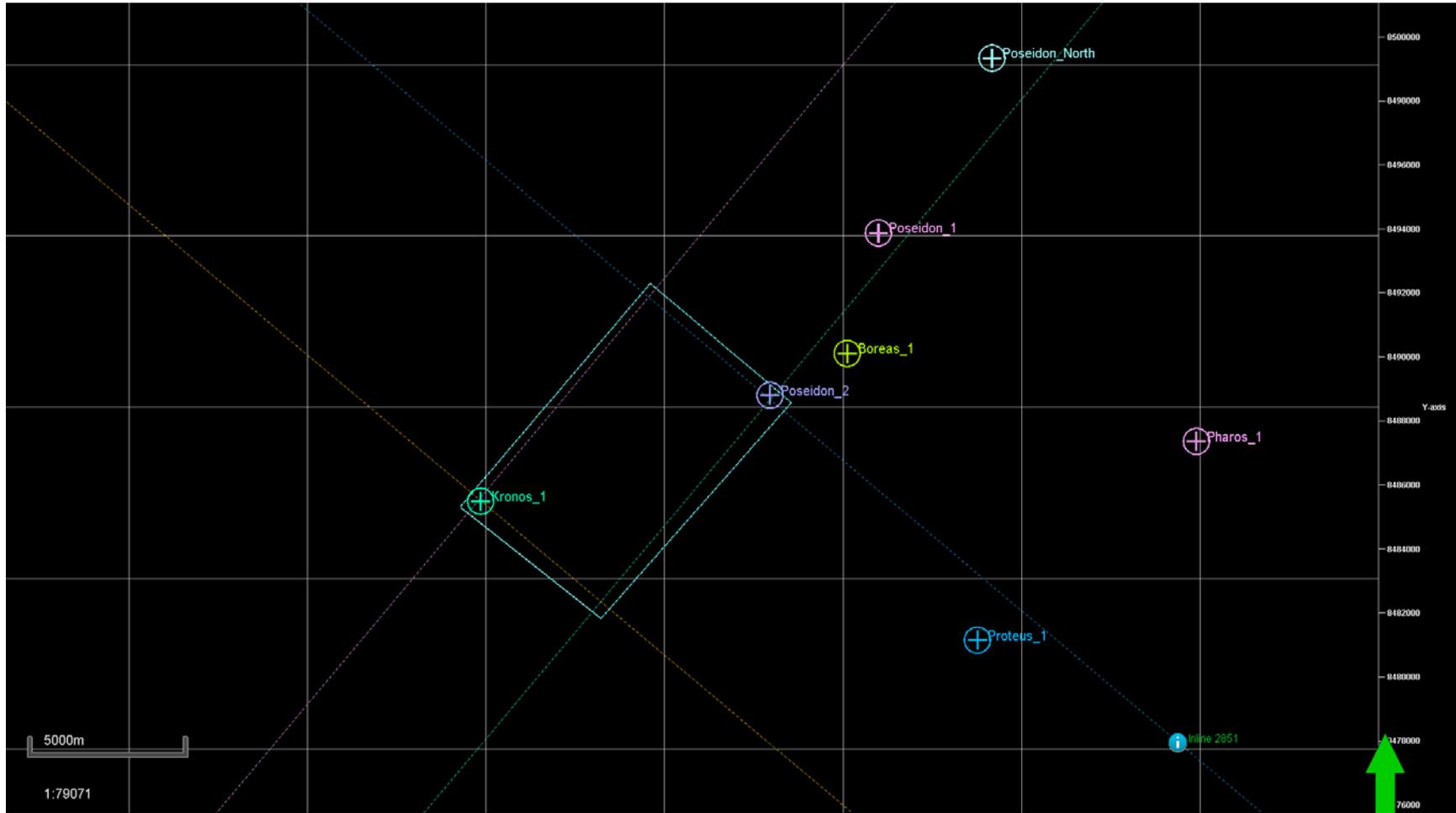
*Xline 2675 bajo el atributo de Energía de reflexión*



Donde se resalta las zonas de alta energía de reflexión (AER) asociadas a la presencia del BSR.

Apéndice I.

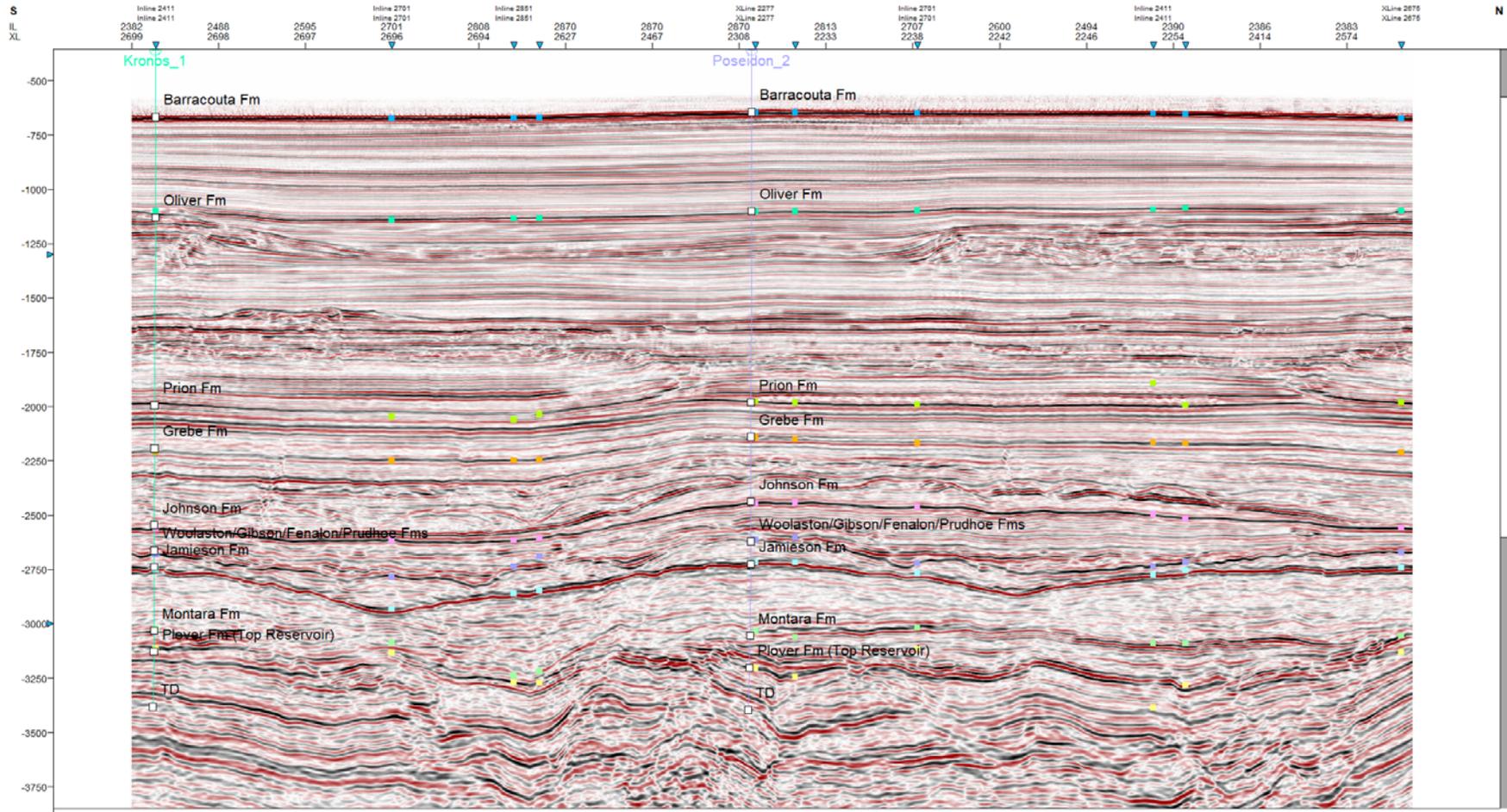
Mapa de ubicación del loop sísmico



Generado creando un polígono arbitrario cercano a las inlines y xlines interpretadas.

Apéndice J.

Loop sísmico



Donde se observa la consistencia de la interpretación sísmica de las inlines y xlines seleccionadas para el estudio con los respectivos pozos con topes estratigráficos.