

# UNRN

Universidad Nacional  
de **Río Negro**



## CARACTERIZACIÓN ESTÁTICA DE LA FORMACIÓN CENTENARIO EN EL YACIMIENTO ESTACIÓN FERNÁNDEZ ORO, PROVINCIA DE RÍO NEGRO, ARGENTINA

Trabajo Final de Licenciatura en Geología

2024

### Estudiante - Autor

Maydana, Facundo Emanuel

[facundoemaydana@gmail.com](mailto:facundoemaydana@gmail.com)

### Director de TFG

Álvarez, Gastón Hugo

[gaston.alvarez@ypf.com](mailto:gaston.alvarez@ypf.com)

### Co-director de TFG

Montagna, Aldo Omar

[aldo.montagna@ypf.com](mailto:aldo.montagna@ypf.com)

## RESUMEN

El presente trabajo aborda la caracterización estática de la Formación Centenario en el yacimiento Estación Fernández Oro (EFO), ubicado en la Cuenca Neuquina, Argentina. El objetivo principal es evaluar su potencial como reservorio para la reinyección de agua de retorno, una práctica esencial para la disposición controlada y segura de este fluido, conforme a la normativa ambiental vigente.

La metodología empleada combina análisis sedimentológicos, estratigráficos y estructurales, integrando registros de pozo, descripción de *cutting* y cálculos petrofísicos. Se procesó la información de 60 pozos mediante el software *tNavigator*, lo que permitió la elaboración de modelos estructurales, isopáquicos y de isopropiedades. Estos modelos facilitaron la identificación de la distribución de las litofacies y la estimación de propiedades clave, como porosidad efectiva y volumen de arcilla.

Los resultados muestran que las areniscas del Miembro Centenario Inferior presentan características favorables como reservorios de reinyección, destacándose por su composición cuarzosa, grano medio y buenas propiedades petrofísicas. En contraste, las sumatoria de los niveles arcillosos del Miembro Centenario Superior actúan como sello hidráulico natural, lo que garantiza la contención de los fluidos inyectados y previene su migración hacia niveles superiores. Esta interpretación se sustenta en la integración de los registros de pozo y la descripción de *cutting*, lo que permitió delimitar los horizontes de ambos miembros de la formación.

El análisis estructural evidenció una inclinación diferencial en los topes de los miembros respecto a la base, atribuida a eventos tectónicos posteriores a la depositación. Esta configuración, junto con la presencia de los sellos hidráulicos, asegura la estabilidad del sistema y la retención de los fluidos inyectados en el subsuelo.

Esta investigación aporta una evaluación integral de la Formación Centenario como unidad potencial para la reinyección de agua de retorno. La combinación de una metodología con el análisis de las propiedades de las litofacies permitió identificar áreas favorables para la ubicación de pozos de reinyección, contribuyendo a la gestión eficiente y ambientalmente segura del agua de retorno.

**Palabras clave:** Formación Centenario, Yacimiento Estación Fernández Oro, caracterización estática, reservorio, agua de retorno, *tNavigator*.

## **ABSTRACT**

This study addresses the static characterization of the Centenario Formation in the Estación Fernández Oro (EFO) field, located in the Neuquén Basin, Argentina. The main objective is to evaluate its potential as a reservoir for the reinjection of flowback water, a key practice for the controlled and safe disposal of this fluid in compliance with a current environmental regulation.

The methodology combines sedimentological, stratigraphic, and structural analyses, integrating well logs, cutting descriptions, and petrophysical calculations. Data from 60 wells were processed using tNavigator software, allowing for the development of structural, isopach, and isoproperty models. These models facilitated the identification of lithofacies distribution and the estimation of key properties such as effective porosity and clay volume.

The results show that the sandstones of the Lower Centenario Member exhibit favorable characteristics as reinjection reservoirs, highlighted by their quartzose composition, medium grain size, and good petrophysical properties. In contrast, the sum of the clayey levels of the Upper Centenario Member acts as a natural hydraulic seal, ensuring the containment of injected fluids and preventing their migration to upper levels. This interpretation is supported by the integration of well log data and cutting descriptions, which allowed for the delineation of the horizons of both members of the formation.

The structural analysis revealed a differential inclination of the member tops relative to the base, attributed to post-depositional tectonic events. This configuration, together with the presence of hydraulic seals, ensures the system's stability and the retention of injected fluids in the subsurface.

This research provides a comprehensive evaluation of the Centenario Formation as a potential unit for flowback water reinjection. The combination of a robust methodology with an analysis of the lithofacies properties enabled the identification of suitable areas for the location of reinjection wells, contributing to the efficient and environmentally safe management of flowback water.

**Keywords:** Centenario Formation, Estación Fernández Oro Field, static characterization, reservoir, flowback water, tNavigator.

## **AGRADECIMIENTOS**

*A mi querida mamá, Fortunata Quiroga, a quién más extraño y extrañaré, gracias por tu amor, por tu acompañamiento y, junto a mi papá, por brindar tu vida por mí y mis hermanos. A mi papá, mi viejito, Felix Pascual Maydana, pilar fundamental de mi vida, quien han moldeado y definido quien soy, gracias por tus consejos, por tus retos y tu acompañamiento incondicional. Solo tengo palabras de agradecimiento y amor para ellos. Soy un agradecido por tenerlos en mi vida.*

*A mis hermanos, Arnaldo, Cecilia y Javier, quienes han cuidado de mí, me acompañan en todo momento. Agradezco a la vida por mi familia y nuestra unión inquebrantable. Gracias por motivarme a crecer y por guiarme a cumplir mis metas, los amo. A mis cuñados, Pablo, Ana y Miriam, en perfecta sintonía con mis hermanos, han sido ejemplo de unión y fortaleza, acompañándome en cada paso de este camino.*

*A mis sobrinos, Matías, Enzo, Sofía, Emir y Emiliano, que son mi vida, mi razón de ser y quienes me hacen el tío más feliz del mundo. Lucho por ellos.*

*A mis tíos y primos, Iduvina, Jorge, Sandra, José y familia, quienes están incondicionalmente para mí, siempre acompañándome en todo momento, soy un agradecido porque seamos familia.*

*A mis amigos, tanto de la vida, Santiago, Agustín, Gustavo y Franco, como mis amistades que he hecho en la facultad y siempre me acompañan cuando viajo a General Roca.*

*A mi director, Gastón Hugo Álvarez, y a mi co-director, Aldo Omar Montagna, por su valioso apoyo y acompañamiento durante todo el desarrollo de este trabajo. Agradezco profundamente su paciencia, sabiduría, y los consejos que me brindaron. Ambos son grandes guías y excelentes personas.*

*A mis demás compañeros que he conocido en la facultad, de quienes he tenido el privilegio de tener su amistad y que también han sabido acompañar y aconsejar. A los profesores y autoridades que he conocido durante mi etapa universitaria, donde la vida me ha dado la oportunidad de aprender de excelentes profesionales y de quien me llevo un cariño muy grande. A la Universidad Nacional de Río Negro por abrirme las puertas y haberme dado la oportunidad convertirme en profesional en la disciplina que desee ser desde pequeño.*

## CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN.....	1
2	UBICACIÓN.....	2
3	OBJETIVOS.....	2
3.1	Objetivo general.....	2
3.2	Objetivos específicos.....	3
4	MARCO GEOLÓGICO.....	3
4.1	Cuenca Neuquina.....	3
4.2	Evolución tectónica.....	3
4.2.1	Etapa syn-rift (Triásico Superior – Jurásico Inferior).....	4
4.2.2	Etapa de post-rift (Jurásico Inferior – Cretácico Inferior).....	4
4.2.3	Etapa de compresión y cuenca de foreland (Cretácico Superior – Cenozoico).....	4
4.3	Dorsal de Huincul.....	5
4.4	Estratigrafía de la cuenca Neuquina.....	6
4.5	Formación Centenario (Valanginiano tardío – Barremiano temprano).....	13
4.5.1	Miembro Centenario Inferior.....	13
4.5.2	Miembro Centenario Superior.....	14
5	TAREAS DE ANÁLISIS Y PROCESAMIENTO DE DATOS.....	14
5.1	Análisis de <i>cutting</i> .....	15
5.2	Interpretación de registros y cálculos petrofísicos.....	15
6	Confección del modelo.....	16
6.1	Registros de pozos.....	21
6.1.1	Tipos de perfiles.....	22
6.2	Propiedades petrofísicas.....	27
6.2.1	Volumen de arcilla.....	28
6.2.2	Porosidad.....	30
6.2.3	Permeabilidad.....	33
6.2.4	Saturación de fluidos.....	33
6.3	Descripción de <i>cutting</i> .....	33
6.4	Facies y electrofacies.....	35
6.5	Correlación de pozos.....	38
6.6	Mapas.....	43
7	RESULTADOS.....	43
7.1	Horizontes y correlación.....	44
7.1.1	Tope Miembro Centenario Superior.....	45

7.1.2	Tope Miembro Centenario Inferior.....	45
7.1.3	Base Miembro Centenario Inferior .....	45
7.2	Litología de los Miembros Centenario Superior y Centenario Inferior).....	51
7.2.1	Miembro Centenario Superior .....	51
7.2.2	Miembro Centenario Inferior (tope) .....	52
7.2.3	Miembro Centenario Inferior (base) .....	54
7.3	Propiedades petrofísicas.....	55
7.3.1	Porosidad.....	55
7.3.2	Porosidad total y efectiva (Miembro Centenario Superior).....	56
7.3.3	Porosidad total y efectiva (Miembro Centenario Inferior) .....	58
7.4	Mapas.....	59
7.4.1	Mapas estructurales.....	59
7.4.2	Mapas isopáquicos .....	62
7.5	Mapas de isovalores .....	63
7.5.1	Mapa de espesor de arenas (Miembro Centenario Inferior) .....	63
7.5.2	Mapa de espesor de arcillas (nivel sello en el Miembro Centenario Superior) ...	64
7.6	Ubicación del pozo .....	65
8	CONCLUSIONES.....	66
9	BIBLIOGRAFÍA .....	68

## ÍNDICE DE FIGURAS, TABLAS Y ECUACIONES

Figura 1. A) Ubicación y límites de la cuenca Neuquina según Casadío y Montagna, 2015. B) Mapa del área de estudio, correspondiente al área de concesión EFO. (Sistema de coordenadas Gauss-Krüger Faja 2 / Datum: Campo Inchauspe)

Figura 2. Regiones morfoestructurales de la cuenca Neuquina. (Modificado de Casadío y Montagna, 2015)

Figura 3. Esquemas de la fase evolutiva de la cuenca neuquina: a) etapa de syn-rift (Triásico Tardío-Jurásico Temprano); b) etapa de post-rift (Jurásico-Cretácico Temprano); c) cuenca de antepaís (Cretácico Tardío-Cenozoico). (Modificado de Howell et al., 2005)

Figura 4. Lineamientos estructurales principales de la Dorsal de Huincul (Extraído de Silvestro y Zubiri, 2008; Mosquera et al., 2011). Se observan los cuatro sectores y las orientaciones principales de las lineaciones estructurales.

Figura 5. Cuadro estratigráfico generalizado de la Cuenca Neuquina, con las principales componentes de sus sistemas petroleros. (Tomado de Vergani et al., 2011)

Figura 6. Mapas paleogeográficos de la primera ingresión – regresión del mar. A) Pliensbachiano – Aaleniano; B) Aaleniano – Bathoniano. (Tomado de Arregui et al., 2011a)

Figura 7. Mapas paleogeográficos de la ingresión - regresión del Tithoniano - Valanginiano. A) Tithoniano inferior a medio; B) Tithoniano superior - Valanginiano inferior. (Tomado de Leanza et al., 2011)

Figura 8. Mapa de las reconstrucciones paleogeográficas de los depósitos de la Formación Agrio (modificado de Spalletti et al., 2011b) para el Valanginiano Tardío - Hauteriviano (A) y Hauteriviano Tardío (B).

Figura 9. Esquema de variación lateral de facies sedimentarias de la Formación Agrio a la Formación Centenario (Modificado de Echeverría, 2018)

Figura 10. Columna estratigráfica en el área EFO (Modificado de Brisson y Veiga, 1999).

Figura 11. Reconstrucciones paleogeográficas de los depósitos de la Formación Centenario y cada uno de sus miembros. A) Miembro Centenario Inferior y B) Miembro Centenario Superior.

Figura 12. En la imagen se observa la lupa binocular con el cutting sobre el vidrio reloj para su observación.

Figura 13. Ventana de trabajo de tNavigator y cada una de sus partes.

Figura 14. Información previa, la cual incluye horizontes y pozos con sus respectivas trayectorias.

Figura 15. Ejemplo de los distintos tipos de medición de la profundidad.

Figura 16. Pozos seleccionados dentro del área de estudio.

Figura 17. Ejemplo de registro eléctrico con las distintas curvas empleadas.

Figura 18. Ejemplo de los pozos EFO-102(d) y EFO-90(d) donde podemos observar que algunos cuentan con distintas curvas con información sobre la zona de interés.

Figura 19. Ejemplo de registro de pozos con distintas curvas.

Figura 20. A) Ejemplo de las respuestas de las herramientas de GR y SP frente a diferentes litologías (Modificado de Casadío y Montagna, 2015). B) Ejemplo de registro real de GR y SP donde se observa su respuesta frente a areniscas y arcilitas.

Figura 21. Registro de la lectura relativa del registro de rayos gamma frente a diferentes litologías (Tomado de Montagna y Astesiano, 2015). La unidad API es una unidad de radioactividad utilizada para los registros de rayos gamma naturales.

Figura 22. Ejemplos reales de lectura de resistividad en capas A) silicoclásticas y frente a B) calizas.

Figura 23. Determinación de capa con gas y arcillas mediante la interpretación del cruce de las curvas densidad-neutrón (Modificado de Montagna y Astesiano, 2015). La curva de gamma ray (GR) está en unidades GAPI, o grados API, medida de la radiactividad natural de las rocas. La curva de densidad (ZDEN) está en gramos por centímetro cúbico ( $\text{g/cm}^3$ ), utilizada para evaluar la compactación y mineralogía. La porosidad neutrón (CNCF) se expresa en decimales, indicando el porcentaje de hidrógeno en el volumen de roca, y la curva del perfil fotoeléctrico (PE) se mide en barnes por electrón (B/E), útil para distinguir entre litologías.

Figura 24. Respuesta de las curvas densidad-neutrón frente a capas arcillosas.

Figura 25. Ubicación de los puntos de menor y mayor lectura de GR, los cuales se utilizaron para el cálculo del volumen de arcilla.

Figura 26. Esquema de los tipos de porosidad presentes en rocas clásticas.

Figura 27. Ventana "cálculos" con la Ecuación 3 ingresada. Véase que "well\_log ("Sónico")" se corresponde con el valor medido por la herramienta, mientras que 55 y 189  $\mu\text{s}/\text{pie}$  se corresponden con el tiempo de tránsito en la matriz y el fluido de perforación, respectivamente.

Figura 28. Se ingresa la ecuación 4 para calcular la porosidad efectiva.

Figura 29. Curva generada de porosidad total (rojo) y efectiva (celeste).

Figura 30. Ejemplo de muestras de cutting para el intervalo desde 1.490 m a 1.550 m seleccionadas para definir el tope del Miembro Centenario Superior.

Figura 31. Definición de las tres electrofacies en los registros de pozo.

Figura 32. Clasificación de electrofacies según el patrón de las curvas de los perfiles: a) areniscas limpias, b) arcilitas y c) areniscas arcillosas.

Figura 33. Paneles de correlación donde se observa la trayectoria de los tres cortes estratigráficos.

Figura 34. Cortes estructurales adicionales utilizados para correlación y generación de mapas.

Figura 35. Corte Noroeste-Sureste de la Formación Centenario. El Miembro Centenario Superior presenta una intercalación de facies arenosas y arcillosas de forma regular en toda su extensión. El Miembro Centenario Inferior presenta una importante proporción de arcilitas con predominancia hacia la base, mientras que las arenas del nivel superior se presentan como arenas limpias, con buenas propiedades físicas.

Figura 36. Corte Noreste-Suroeste de la Formación Centenario. Se observa una somerización de la estructura hacia el Suroeste con inclinación diferencial de los topes respecto a la base de la formación. Los espesores de los niveles arenosos se mantienen. La geometría de la estructura de la Formación Centenario parece haber sido afectada posteriormente a su depositación.

Figura 37. Corte Noreste-Suroeste de la Formación Centenario. De forma similar se observa una inclinación diferencial entre los topes de ambos miembros y la base de la formación.

Figura 38. Ubicación de los horizontes correspondientes a la base del Grupo Neuquén y el nivel calcáreo de la Formación Loma Montosa, que determinan el espesor total del intervalo de estudio.

Figura 39. Sección de correlación del marcador correspondiente al tope de la Formación Centenario. El marcador permite diferenciar entre los patrones de las formaciones por encima y por debajo del mismo, con mayor intercalación de electrofacies de areniscas y arcillas en el Miembro Centenario Superior, y predominantemente arenoso hacia la Formación Rayoso (por encima del marcador).

Figura 40. Correlación del tope de la Formación Centenario. En el pozo EFO-125(d) se aprecia el cambio en las electrofacies que permitieron definir el marcador.

Figura 41. Sección de correlación con el marcador correspondiente al tope del Miembro Centenario Inferior. Sobre el marcador del tope se observa un importante nivel de arcillas que constituye, en forma conjunta, el sello en el Miembro Centenario Superior.

Figura 42. Sección de correlación con el marcador correspondiente a la base de la Formación Centenario. El Miembro Centenario Inferior culmina con predominancia de arcillas hacia su sector inferior, cambiando a sedimentitas más gruesas por debajo del marcador.

Figura 43. Muestras de cutting analizadas y su ubicación en profundidad para el tope del Miembro Centenario Superior.

Figura 44. Muestras de cutting analizadas y su ubicación en profundidad en el tope del Miembro Centenario Inferior.

Figura 45. Muestras de cutting analizadas y su ubicación en profundidad para la base de la Formación Centenario.

Figura 46. Curvas de porosidad total y efectiva en el Miembro Centenario Superior. A la izquierda el pozo EFO-1037(d) y a la derecha el pozo EFO-125(d), respectivamente. En amarillo se resaltan las areniscas y su correspondencia con los valores calculados de porosidad más elevados.

Figura 47. Valores de porosidades total y efectiva en el Miembro Centenario Inferior. A la izquierda el pozo EFO-1037(d) y a la derecha el pozo EFO-125(d), respectivamente. En amarillo se resaltan las areniscas y su correspondencia con los valores calculados de porosidad más altos.

Figura 48. Mapa estructural del tope del Miembro Centenario Superior. Al Suroeste se señala la ubicación del alto estructural o zona de menor profundización.

Figura 49. Mapa estructural del tope del Miembro Centenario Inferior. La estructura profundiza hacia el Este, con un cierre estructural aproximado a los 60 m.

Figura 50. Mapa estructural de la base del Miembro Centenario Inferior. La estructura presenta una mayor complejidad, profundiza hacia el Este, con las zonas más elevadas en el sector central Sur y hacia el Oeste. Las cotas entre mayor y menor profundidad son de 50 m aproximadamente.

Figura 51. Mapa isopáquico del Miembro Centenario Superior. El espesor de la formación es regular, la diferencia de potencia no supera 50 m.

Figura 52. Mapa isopáquico del Miembro Centenario Inferior. El espesor de la unidad es regular en su extensión, con diferencias de potencia de 40 m aproximadamente, llegando a un espesor máximo de 500 m hacia el Este.

Figura 53. Mapa de espesores de arenas. Hacia el centro Norte se observa la mayor acumulación de arenas, mientras que hacia el Sur y Sureste hay menor proporción de arenas. Nuestra zona de interés se encuentra hacia el Oeste donde los espesores se aproximan a 160 m.

Figura 54. Mapa de espesor de las arcillas en el Miembro Centenario Superior, mostrando una mayor acumulación hacia el Sur suroeste. Nuestro intervalo de interés es cercano al pozo EFO-85, donde se observan arcillas de 120 a 140 m de potencia.

Figura 55. Ubicación propuesta para inyección de agua en el Miembro Centenario Inferior (cuadrado naranja).

Figura 56. Espesor de arenas del nivel superior en el Miembro Centenario Inferior. En la ubicación propuesta (cuadrado naranja) el espesor de arenas del nivel superior del Miembro Centenario Inferior varía entre 120 y 140 m.

Tabla 1. En la tabla se nombran los 60 pozos seleccionados con datos de control geológico y registros de pozo.

Ecuación 1. Cálculo volumen de arcilla a partir de valores de GR.

Ecuación 2

Ecuación 3. Ecuación para el cálculo de la porosidad total

Ecuación 4. Ecuación para el cálculo de la porosidad efectiva.

## 1 INTRODUCCIÓN

Esta investigación se centra en el estudio de la Formación Centenario, una unidad geológica con una variedad de litofacies asociadas a distintos ambientes depositacionales. Definida originalmente por Digregorio en 1972, la Formación Centenario abarca extensas sucesiones de sedimentos clásticos continentales, distribuidos en sectores del Engolfamiento, la Plataforma Nororiental y la Dorsal de Huincul (Fig. 2). Dentro de esta amplia distribución, se ha seleccionado el área de concesión Estación Fernández Oro (en adelante EFO) como objeto de estudio debido al potencial que presenta la Formación Centenario en esta zona, caracterizada por contener exclusivamente agua de formación y por sus propiedades petrofísicas favorables para la reinyección de agua de retorno. Esta área se encuentra geográficamente ubicada entre los 38°58' y 39°04' de latitud Sur, y los 67°59' y 67°44' de longitud Oeste, cerca de la ciudad de Allen, en la provincia de Río Negro (Fig. 1).

El yacimiento EFO es un importante bloque productivo de gas, donde las principales unidades productivas son las formaciones Lajas y Quintuco, cuyos reservorios son estimulados de manera hidráulica, lo que requiere grandes volúmenes de agua. Parte de esta agua retorna a la superficie como *flowback* (o agua de retorno), que no es potable debido a su contacto con hidrocarburos y a los remanentes de aditivos químicos utilizados durante el proceso, el cual se almacena en la planta de tratamiento de YPF (Fig. 1). Las regulaciones ambientales, como la ley N° 24.051 (Ley Nacional de Residuos Peligrosos), son estrictas respecto al tratamiento de estas sustancias, prohibiendo el contacto del agua con el medio ambiente en todas las etapas de la operación y obligando por tanto a su tratamiento sin excepción. Entre las alternativas de manejo del agua de retorno se encuentra su reinyección en formaciones del subsuelo previamente seleccionadas. Este método permite cumplir con los estándares ambientales, permitiendo devolver el agua a unidades geológicas específicas donde no representa un riesgo para el entorno. La selección de estas formaciones requiere un análisis de sus propiedades petrofísicas y estructurales, garantizando que actúen como reservorios adecuados y estén selladas por capas impermeables que eviten la migración de fluidos hacia niveles superiores.

El objetivo principal de este estudio es analizar las características sedimentarias, estratigráficas y estructurales de la Formación Centenario en el área de concesión EFO, investigando las propiedades petrofísicas de las rocas y su relación con la distribución de las litofacies, con el fin de evaluar la calidad reservorio para la inyección de agua y determinar la existencia de un sello hidráulico que actúe como barrera sobre la unidad objetivo. Los

resultados de este análisis comprenden importantes implicaciones en la exploración y explotación de recursos naturales, ya que al evaluar la calidad del reservorio permitirá identificar áreas propicias para la inyección de agua, lo cual es de gran importancia para proyectos de pozos inyectoros marginales.

## 2 UBICACIÓN

El yacimiento EFO se encuentra al sureste de la cuenca Neuquina (Fig. 1B), en el flanco norte del extremo oriental de la Dorsal de Huincul, un rasgo morfológico destacado en la cuenca Neuquina, de orientación general Este-Oeste. El área del yacimiento EFO está situada principalmente sobre la llanura de inundación del río Negro, en la región del Alto Valle de la provincia de Río Negro (Fig. 1A), una zona conocida por su significativa actividad frutícola, especialmente en la producción de manzana y pera.



Figura 1. A) Ubicación y límites de la cuenca Neuquina según Casadío y Montagna, 2015. B) Mapa del área de estudio, correspondiente al área de concesión EFO. (Sistema de coordenadas Gauss-Krüger Faja 2 / Datum: Campo Inchauspe)

## 3 OBJETIVOS

### 3.1 Objetivo general

El objetivo general de este estudio es definir la posición de un pozo inyector marginal dentro de la Formación Centenario en el yacimiento EFO, mediante el análisis de datos de perforación adquiridos por la empresa YPF entre los años 2009 y 2017. Los pozos inyectoros marginales se utilizan para la disposición de fluidos, como el agua de retorno, en formaciones geológicas con capacidad de almacenamiento limitada o que no forman parte de los reservorios principales de producción. Este análisis contribuirá a la preparación de la documentación técnica requerida para obtener una licencia ambiental para la perforación del pozo mencionado.

### 3.2 Objetivos específicos

Como objetivos específicos se destacan las acciones que permiten construir una base conceptual y práctica para llevar a cabo el trabajo. Se evalúa la calidad del reservorio de los potenciales niveles donde se reinyectará agua y se define la existencia de un sello hidráulico que permita aislar el fluido a inyectar en los niveles inferiores.

Se interpretan perfiles de pozo con la finalidad de realizar la correlación de pozos. Además, se analizan recortes de perforación (*cutting*) para definir las facies y asociación de facies presentes a fin de definir el potencial de admisión y de sello de las rocas. Se integra la información de subsuelo, tanto directa como indirecta, para confeccionar mapas 2D de subsuelo (estructural e isopáquico).

## 4 MARCO GEOLÓGICO

### 4.1 Cuenca Neuquina

La cuenca Neuquina es una cuenca sedimentaria que se encuentra ubicada en el centro-oeste de la República Argentina (Fig. 2) y es una de las mayores productoras de hidrocarburos de América del Sur. Tiene una superficie de aproximadamente 120.000 km<sup>2</sup>, alcanzando, en algunos sectores, un registro estratigráfico del orden de los 6.000 m de espesor que incluye rocas marinas y continentales, con edades que van desde el Triásico superior al Paleógeno (Casadío y Montagna, 2015). Se encuentra delimitada hacia el Noreste y Sureste por bloques de naturaleza cratónica, mientras que hacia el Oeste limita con la cordillera de los Andes.

### 4.2 Evolución tectónica

Su evolución transcurre en tres estadios principales (Fig. 3): estadio de *sinrift* (Triásico tardío/Jurásico Temprano), estadio de *postrift* (Jurásico Medio/Cretácico temprano) y estadio de antepaís (Cretácico tardío-Cenozoico) (Howell *et al.*, 2005).

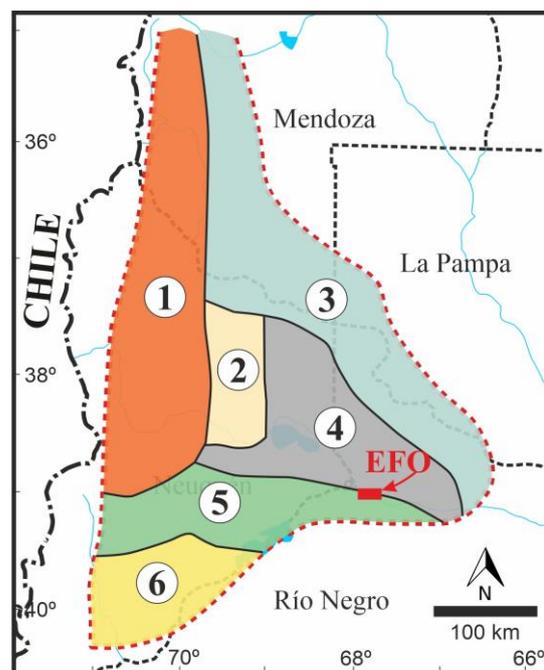


Figura 2. Regiones morfoestructurales de la cuenca Neuquina (Modificado de Casadío y Montagna, 2015). 1- Faja Plegada; 2- Alto de los Chihuidos; 3- Plataforma Nororiental; 4- Engolfamiento; 5- Dorsal de Huincul; 6- Sur de la Dorsal

#### **4.2.1 Etapa *syn-rift* (Triásico Superior – Jurásico Inferior)**

La cuenca Neuquina se originó en el Triásico Superior como resultado de una extensión continental de intraplaca, generándose durante este periodo una serie de depresiones extensionales que fueron rellenándose con depósitos volcánicos y continentales (Howell *et al.*, 2005), con depocentros delimitados por fallas normales planas, presentando comúnmente geometría de hemigrábenes (Franzece y Spalletti, 2001). El último evento de esta etapa tectónica fue la extensión del Jurásico Inferior relacionada con el colapso del orógeno de Gondwana (Franzese y Spalletti, 2001) donde se formaron hemigrábenes largos y estrechos, dominados por rocas volcánicas continentales y depósitos marinos poco profundos locales (Fig. 3A). Finalmente, estos depocentros se integraron en la cuenca Neuquina desarrollando facies lacustres y marinas poco profundas generalizadas (Franzese *et al.*, 2003).

#### **4.2.2 Etapa de *post-rift* (Jurásico Inferior – Cretácico Inferior)**

Durante el Jurásico Inferior y Medio se inició un régimen de subducción a lo largo del margen occidental de Gondwana (Franzese *et al.*, 2003). Hacia el Jurásico Superior, el desarrollo casi completo del arco magmático andino (Howell *et al.*, 2005) facilitó una expansión del dominio marino, lo que resultó en la inundación progresiva de la cuenca desde el proto-pacífico. Inicialmente, la topografía generada durante la etapa de *syn-rift* controló la sedimentación, pero posteriormente, la subsidencia térmica y la extensión detrás del arco generaron las condiciones para la depositación de potentes sucesiones sedimentarias que representan la fase evolutiva más importante de la Cuenca Neuquina. Este periodo incluye una serie compleja de ciclos transgresivos-regresivos de diferente magnitud, controlados por los efectos combinados de cambios en el grado de subsidencia, elevación localizada y oscilaciones eustáticas del nivel del mar, generando la depositación de los grupos Cuyo, Lotena y Mendoza, hacia el Cretácico Inferior (Howell *et al.*, 2005).

#### **4.2.3 Etapa de *compresión y cuenca de foreland* (Cretácico Superior – Cenozoico)**

Esta etapa está representada por el amplio desarrollo de depósitos continentales (Fig. 3C) incluidos en el Grupo Neuquén, que contiene un registro fósil de las faunas de dinosaurios más interesantes del mundo. El Grupo Neuquén está cubierto por las rocas sedimentarias clásticas y carbonáticas de ambientes marinos someros del Grupo Malargüe, que representa la primera transgresión atlántica en la cuenca. En la base del Cretácico Superior, se produjo una nueva fase de deformación (movimientos “Intrasononianos”) que reactivó antiguas zonas de debilidad y originó importantes cambios paleogeográficos en la cuenca (Casadío y Montagna, 2015).

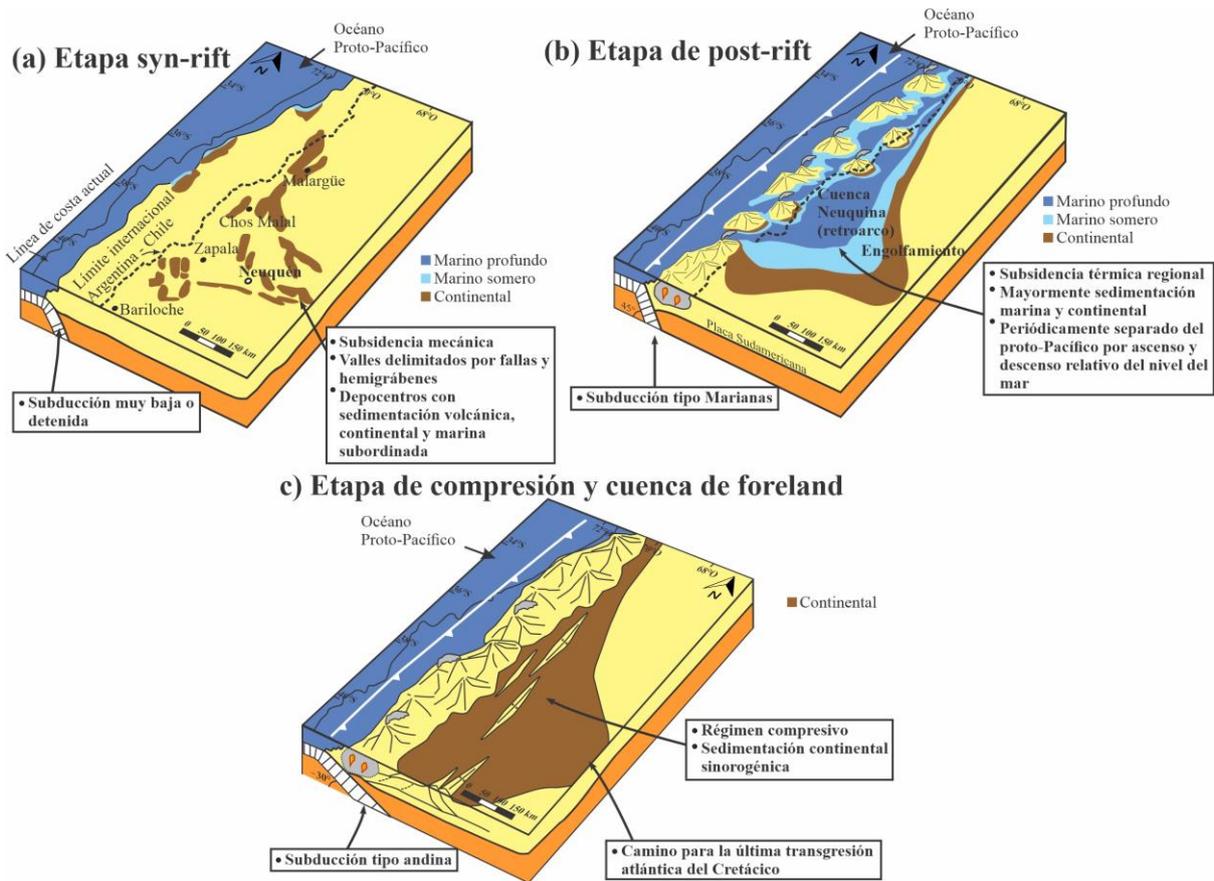


Figura 3. Esquemas de la fase evolutiva de la cuenca neuquina: a) etapa de *syn-rift* (Triásico Tardío-Jurásico Temprano); b) etapa de *post-rift* (Jurásico-Cretácico Temprano); c) cuenca de antepaís (Cretácico Tardío-Cenozoico). (Modificado de Howell *et al.*, 2005)

### 4.3 Dorsal de Huincul

La Dorsal de Huincul es un rasgo morfoestructural sobresaliente en la cuenca Neuquina, con una orientación general Este-Oeste (Fig. 4). Se extiende por aproximadamente 270 a 300 km a lo largo del 39° Sur, marcando el límite natural norte de la región patagónica (Silvestro y Zubiri, 2008, y Mosquera *et al.*, 2011). La configuración estructural de la Dorsal de Huincul se asocia a la sutura entre la microplaca de Patagonia y Gondwana Occidental, lo que la convierte en un cinturón de deformación de intraplaca (Mosquera *et al.*, 2011). Este lineamiento se desarrolló bajo la influencia de la dinámica del margen convergente del Pacífico, donde la interacción entre la placa oceánica y la corteza continental generó fallas inversas, transcurrentes y transtensivas (Giampaoli y Brisson, 2015). Las anisotropías del basamento también desempeñaron un papel clave, controlando la orientación de las estructuras y los estilos de deformación de la dorsal (Mosquera *et al.*, 2011).

Las características de este rasgo estructural permiten reconocer cuatro sectores: sector occidental, sector oriental, sector central y un sector norte. Además, se destaca la presencia de tres orientaciones de lineamientos estructurales en la Dorsal de Huincul: Noreste-Suroeste,

Noroeste-Sureste y Este-Oeste. Los lineamientos Noroeste-Suroeste se desarrollan principalmente en el sector occidental de la dorsal, donde predominan las fallas inversas de basamento con rechazos verticales significativos y escasa componente de desplazamiento de rumbo, lo que genera pliegues con vergencia hacia el Sureste. Los lineamientos Noroeste-Sureste se encuentran a lo largo de toda la dorsal, asociados a zonas de cizalla con desplazamiento lateral dextral, dando lugar a estructuras transpresivas que se manifiestan en forma de estructuras de flor positivas o negativas. Finalmente, los lineamientos Este-Oeste están más restringidos al sector central de la dorsal y son estructuras anticlinales que se asocian a fallas de basamento con rechazo de tipo inverso, afectados también por desplazamientos de rumbo dextrales, generando fallamiento extensional perpendicular al eje del anticlinal (Silvestro y Zubiri, 2008).

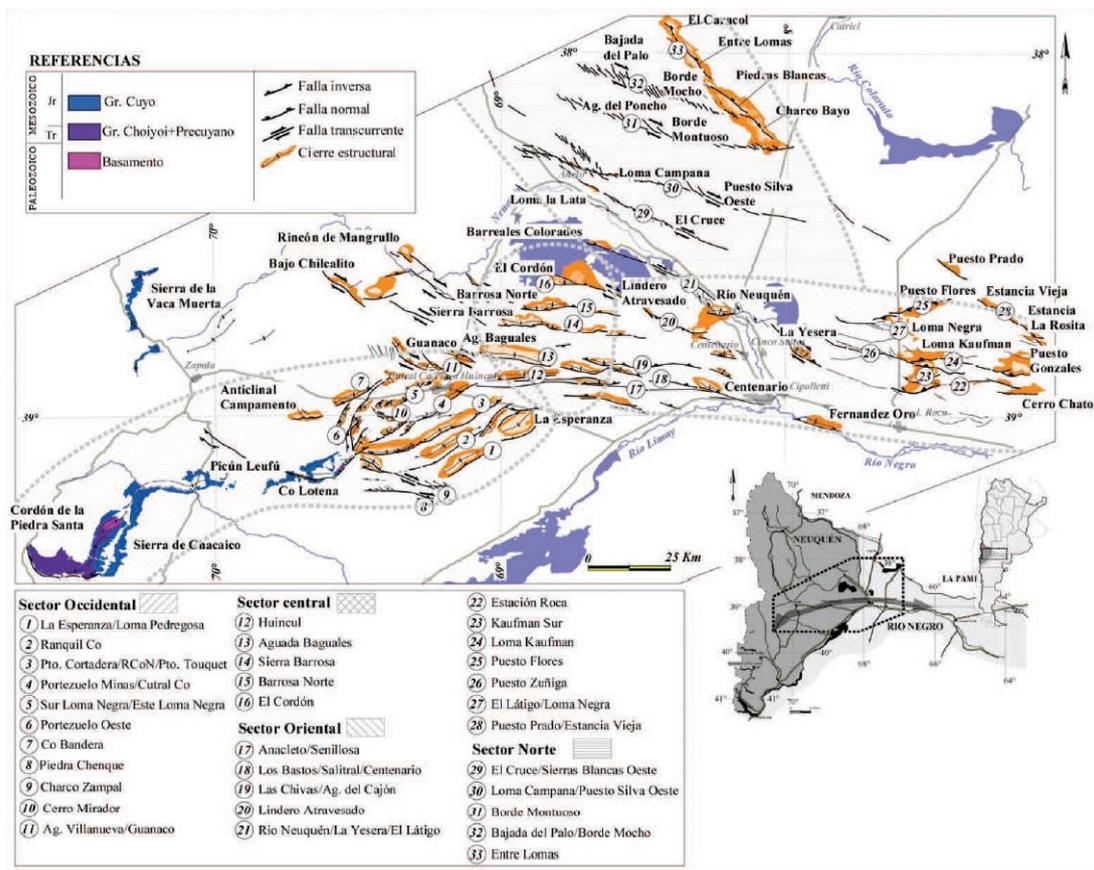


Figura 4. Lineamientos estructurales principales de la Dorsal de Huincul (Extraído de Silvestro y Zubiri, 2008; Mosquera *et al.*, 2011). Se observan los cuatro sectores y las orientaciones principales de las lineaciones estructurales.

#### 4.4 Estratigrafía de la cuenca Neuquina

La historia geológica de la cuenca está marcada por una evolución tectónica dinámica, caracterizada por diferentes fases de deformación y cambios asociados a las transgresiones y regresiones marinas sobre la región (Fig. 5).

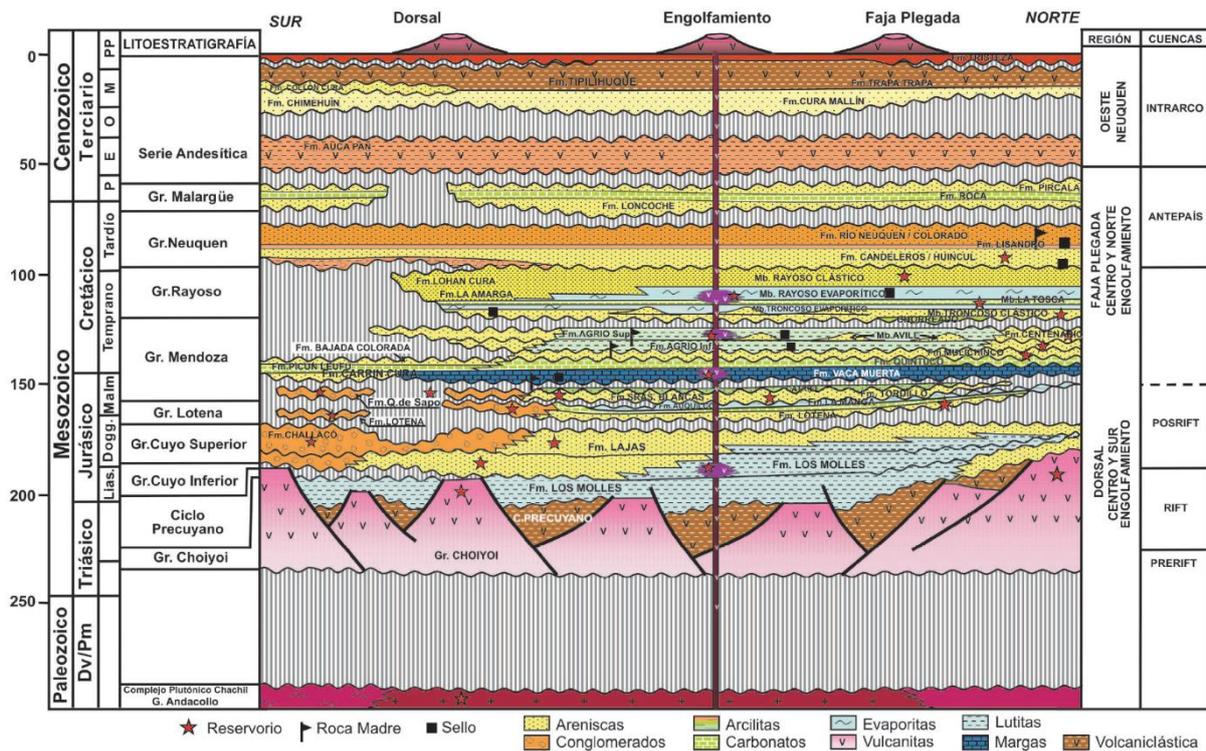


Figura 5. Cuadro estratigráfico generalizado de la Cuenca Neuquina, con las principales componentes de sus sistemas petroleros. (Tomado de Vergani *et al.*, 2011)

El basamento está integrado por metamorfitas de bajo grado de edad silúrica y devónica, y rocas plutónicas, volcánicas y piroclásticas del Grupo Choiyoi, correspondiente a una intensa actividad magmática que se extendió desde el Carbonífero Tardío al Triásico Inferior, alcanzando su máximo desarrollo entre el Pérmico Temprano y el Triásico Temprano (Casadío y Montagna, 2015, y Llambías y Sato, 2011). Sobre el mismo, se desarrollaron sucesiones de *syn-rift* que representan eventos volcánicos y depósitos epiclásticos, agrupadas dentro del ciclo Precuyano (Gulisano *et al.*, 1984 en Casadío y Montagna, 2015). Dentro de esta secuencia se distinguen cinco tipos de unidades, como flujos de lava, intrusiones someras, depósitos piroclásticos, aluviales volcanoclásticos, aluviales polimícticos y lacustres (Muravchik *et al.*, 2011).

Groeber (1946) define tres grandes ciclos sedimentarios separados por discordancias de carácter regional, los ciclos Jurásico, Ándico y Riográndico. El ciclo Jurásico comprende los subciclos Cuyano y Loteniano-Chacayano y se extiende desde el Triásico hasta el Kimmeridgiano, luego el ciclo Ándico comprende mayoritariamente los depósitos marinos del Grupo Mendoza y transicionales a continentales del Grupo Bajada del Agrio (antes conocido como Grupo Rayoso) y se extiende desde el Kimmeridgiano hasta el Albiano, mientras que el ciclo Riográndico abarca el Cretácico Superior y el Paleoceno (Aguirre-Urreta, 2024).

Por encima de los depósitos precuyanos tenemos el Grupo Cuyo o subciclo Cuyano, el cual fue datado como depositado durante el Pliensbachiano – Toarciano en la provincia de Neuquén y más tempranamente (Sinemuriano - Hettangiano) en el sur de la provincia de Mendoza (Arregui *et al.*, 2011a). Fue un periodo de hundimiento termal que generó un registro sedimentario de edad Jurásica que representa la primera ingresión – regresión del mar sobre la cuenca. Está compuesto por sedimentos de diferentes ambientes depositacionales que comprenden una amplia variedad de facies, desde continentales y de transición a marinas (Malone *et al.*, 2002). La inundación tiene su máxima expansión en el Toarciano – Aaleniano (Fig. 6A), generando la depositación de las sedimentitas de mar profundo de la Formación Los Molles, compuestas mayormente por pelitas grises y gris oscuras ricas en materia orgánica que alternan con areniscas finas hasta gruesas y conglomerados (Arregui *et al.*, 2011a), y que convierten a esta formación en roca generadora de hidrocarburos. Cubriendo estas sedimentitas marinas, a partir de un periodo de regresión (Fig. 6B), se dispone la Formación Lajas, que va de ambiente fluvio-deltaico a deltaico-marino, y que contiene importantes reservorios (Casadío y Montagna, 2015). Finalmente, la máxima regresión correspondiente a la parte superior del Grupo Cuyo culmina de distintas maneras en las diferentes regiones morfoestructurales de la cuenca Neuquina, la cual está representada por las facies fluvio – aluviales de las formaciones Punta Rosada y Challacó, mientras que en otros sectores de la cuenca corresponde a los depósitos evaporíticos asignados a la Formación Tábanos (Casadío y Montagna, 2015). A partir de una reactivación tectónica en la cuenca, se produjo la depositación del subciclo Loteniano – Chacayano o Grupo Lotena, cuya edad está determinada entre el Calloviano medio y el Oxfordiano superior, y delimitada en base y techo por sendas discordancias (Intracalloviana e Intramálmica) (Arregui *et al.*, 2011b). Este evento está caracterizado por depósitos de sedimentos clásticos y carbonáticos (formaciones Lotena y Barda Negra) que representan un ciclo transgresivo – regresivo durante el que se depositaron las calizas arrecifales en la base (Formación La Manga) y evaporitas hacia la parte superior (Formación Auquilco o Yeso Principal) (Casadío y Montagna, 2015).

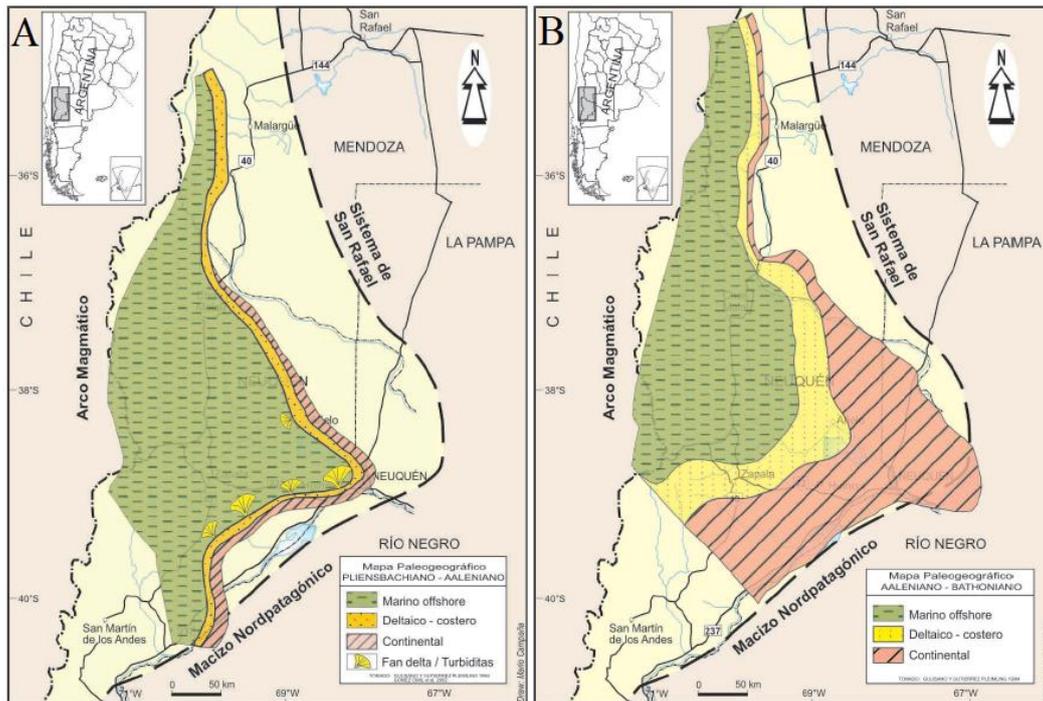


Figura 6. Mapas paleogeográficos de la primera ingresión – regresión del mar. A) Pliensbachiano – Aaleniano; B) Aaleniano – Bathoniano. (Tomado de Arregui *et al.*, 2011a)

El Ciclo Ándico se desarrolla a partir del Kimmeridgiano donde se produjo un importante cambio paleogeográfico producto del alzamiento y migración del arco volcánico que anularon las conexiones con el pacífico (Casadío y Montagna, 2015). Aquí comienza el Grupo Mendoza, con una continentalización de la cuenca, la cual está representada por las sedimentitas clásticas continentales del Kimmeridgiano de la Formación Tordillo y sus equivalentes Formación Sierras Blancas, Catriel y Quebrada del Sapo. En gran parte de la Cuenca Neuquina, las sedimentitas de la Formación Tordillo y sus equivalentes suceden estratigráficamente a rocas carbonáticas y evaporitas de las formaciones La Manga y Auquilco, respectivamente (Spalletti *et al.*, 2011a). Estos depósitos continentales culminan abruptamente en el Tithoniano temprano y son cubiertos por las pelitas oscuras de la Formación Vaca Muerta generadas durante una inundación marina de gran extensión (Fig. 7A) (Casadío y Montagna, 2015), las cuales presentan un arreglo retrogradante (Leanza *et al.*, 2011) y un elevado contenido de materia orgánica. Las rocas de las formaciones Tordillo y Vaca Muerta constituyen, junto a las que representan progradaciones clásticas-carbonáticas de ambiente proximal (las formaciones Loma Montosa y Quintuco) (Fig. 7B), la base del Grupo Mendoza o Mendociano inferior (Casadío y Montagna, 2015). Posteriormente, a partir del importante descenso del mar durante el Valanginiano temprano, se depositaron en sectores deprimidos, las

facies clásticas continentales, transicionales y marinas de la Formación Mulichinco (Casadío y Montagna, 2015).

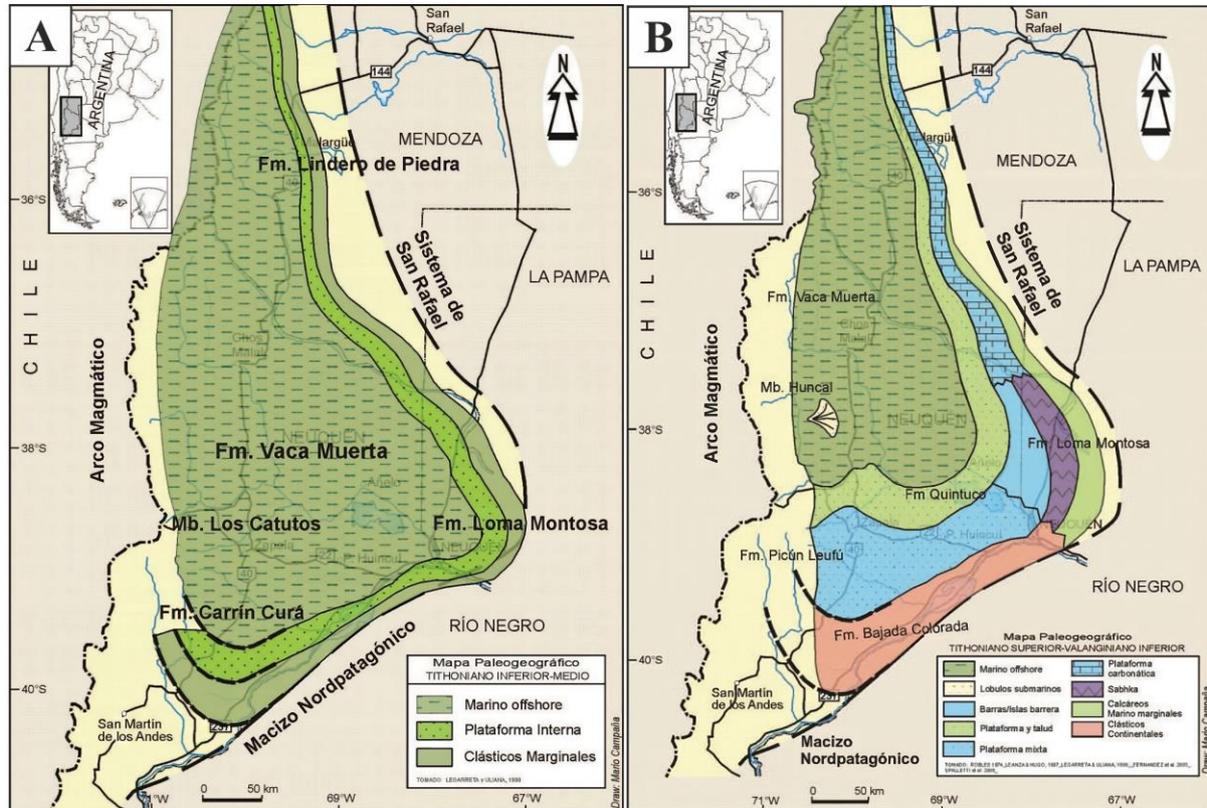


Figura 7. Mapas paleogeográficos de la ingresión - regresión del Tithoniano - Valanginiano. A) Tithoniano inferior a medio; B) Tithoniano superior - Valanginiano inferior. (Tomado de Leanza *et al.*, 2011)

Durante el Valanginiano Tardío al Barremiano Temprano, una nueva ingresión desde el Pacífico dio lugar a la sedimentación de la Formación Agrio (Fig. 8). Esta unidad se deposita sobre la Formación Mulichinco, apoyándose sobre una importante superficie transgresiva de desarrollo regional. En los sectores axiales del depocentro neuquina, la Formación Agrio alcanza espesores del orden de los 1.500 m. Dicha unidad se divide en tres miembros, los miembros inferior (Miembro Pilmatué) y superior (Miembro Agua de la Mula) de la Formación Agrio que están constituidos por espesas sucesiones de lutitas oscuras acumuladas en ambiente marino, entre las que intercalan las sedimentitas continentales (fluviales, eólicas y lacustres) correspondientes al Miembro Avilé (Fig. 9) depositadas durante un episodio de brusca caída del nivel del mar. En el subsuelo de la Cuenca Neuquina, especialmente en la región oriental y nororiental del Engolfamiento, contemporánea a la Formación Agrio, se aprecia un importante cambio de facies, compuesto por un espeso registro de areniscas, conglomerados y fangolitas de ambiente continental y transicionales de la Formación Centenario (Pazos *et al.*, 2020; Spalletti *et al.*, 2011b) (Fig. 9). Dicha unidad

comprende potentes secuencias de sedimentos terrígenos clásticos rojizos (Cabaleiro *et al.*, 2002) e integra la sección superior del Grupo Mendoza, formación que abarca el intervalo Valanginiano tardío – Barremiano temprano (Casadío y Montagna, 2015). Suprayacente a estas unidades tenemos niveles sedimentarios continentales, marinos someros y evaporíticos del Barremiano – Aptiano de las formaciones Huitrín (Miembros Chorreado, Troncoso y La Tosca) y Rayoso, esta última de edad aptiana – albiana (Casadío y Montagna, 2015).

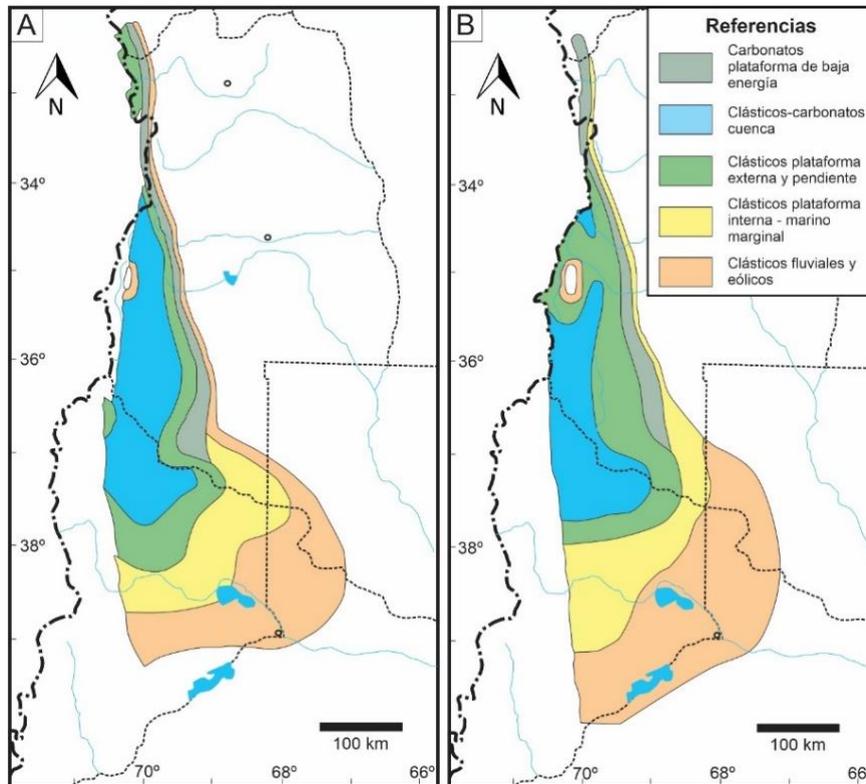


Figura 8. Mapa de las reconstrucciones paleogeográficas de los depósitos de la Formación Agrio (modificado de Spalletti *et al.*, 2011b) para el Valanginiano Tardío - Hauteriviano (A) y Hauteriviano Tardío (B).

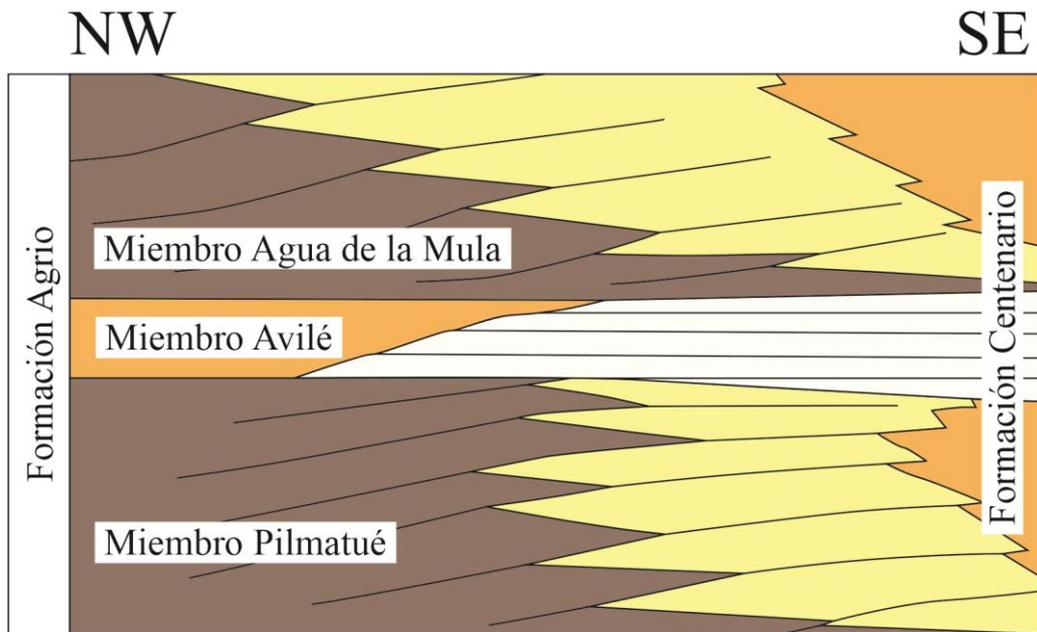


Figura 9. Esquema de variación lateral de facies sedimentarias de la Formación Agrio a la Formación Centenario (Modificado de Echeverría, 2018)

Finalmente, el ciclo Riográndico está representado por un amplio desarrollo de depósitos continentales incluidos en el Grupo Neuquén, seguido por las rocas sedimentarias clásticas y carbonáticas de ambientes marinos someros del Grupo Malargüe, que representa la primera transgresión atlántica en la cuenca.

#### 4.5 Formación Centenario (Valanginiano tardío – Barremiano temprano)

El estudio está enfocado en la Formación Centenario (Fig. 10), que presenta una amplia variedad de litofacies asociadas a diferentes ambientes depositacionales. La Formación Centenario es una formación de subsuelo de origen continental, cuyo nombre deriva del yacimiento Centenario, ubicado al suroeste de la ciudad homónima y a unos 6 km al oeste de la ciudad de Neuquén. Esta formación fue definida por Digregorio (1972) y se caracteriza por agrupar potentes secuencias de sedimentos continentales clásticos y de transición. Estos sedimentos están ampliamente distribuidos en los sectores del Engolfamiento y en la Plataforma Nororiental de la cuenca, y se pueden reconocer los miembros Centenario Superior y Centenario Inferior que reflejan diferentes eventos geológicos y condiciones ambientales.

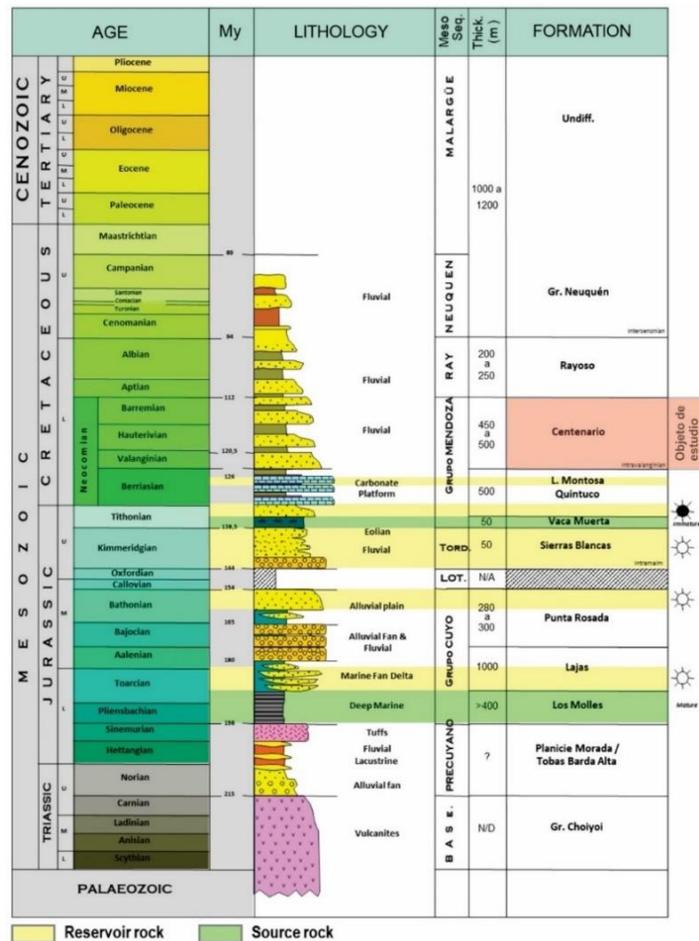


Figura 10. Columna estratigráfica en el área EFO (Modificado de Brisson y Veiga, 1999).

##### 4.5.1 Miembro Centenario Inferior

Este abarca desde el Valanginiano superior hasta el Hauteriviano inferior y comienza con una ingesión marina que está mejor representada hacia el interior de la cuenca por las pelitas de la Formación Agrio. Sobre este evento se produjo una progradación donde se distingue una ciclicidad de bajo orden, asociada a variaciones periódicas en el nivel del mar. En general, está representado por una alternancia de areniscas y pelitas, depositadas en paleoambientes litorales, deltaicos y fluviales distales, que hacia el este gradan a areniscas y conglomerados rojizos de facies fluviales proximales y arcilitas de llanura de inundación (Cabaleiro *et al.*, 2002) (Fig. 11A).

#### 4.5.2 Miembro Centenario Superior

Abarca el resto del Hauteriviano y también inicia con un intervalo transgresivo, representado por niveles pelíticos, mientras que por encima progresa un sistema compuesto por sedimentos continentales clásticos. Dentro de este sistema se vuelven a repetir ciclos transgresivos y regresivos asociados a cambios menores del nivel del mar, representados por areniscas y arcilitas en facies fluviales de ríos entrelazados hacia el oeste y facies fluviales más proximales hacia el este (Cabaleiro *et al.*, 2002) (Fig. 11B).

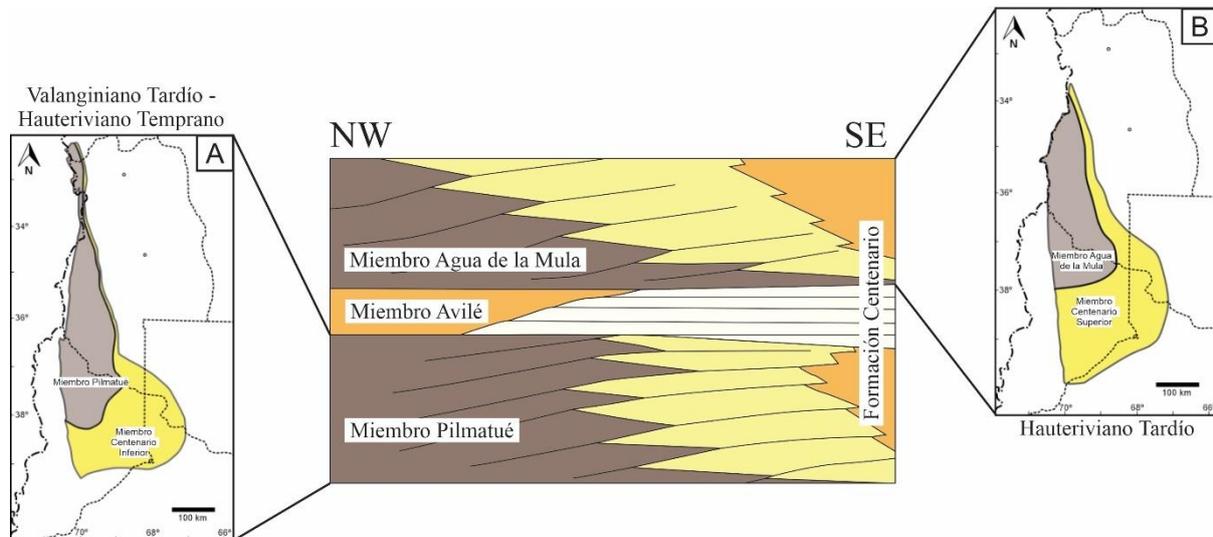


Figura 11. Reconstrucciones paleogeográficas de los depósitos de la Formación Centenario y cada uno de sus miembros. A) Miembro Centenario Inferior y B) Miembro Centenario Superior.

La Formación Centenario presenta rocas esencialmente psamíticas y de tonalidades rojizas claras. Está integrada por areniscas líticas y arcósicas, limolitas, arcilitas y vaque cuarzoso. Contienen un cemento mayormente carbonático y la matriz es arcillosa, en parte caolinítica (Digregorio, 1972). Hacia el este de la cuenca se presentan depósitos aluviales, deltaicos, fluviales entrelazados y proximales. Los bancos clásticos gruesos están asociados a las zonas de canales fluviales, representando potenciales reservorios, mientras que las arcilitas representan a las facies de planicie de inundación, pudiendo ser potenciales sellos, debido a la muy baja (o nula) permeabilidad de estas rocas.

## 5 TAREAS DE ANÁLISIS Y PROCESAMIENTO DE DATOS

Dentro de la metodología de trabajo se plantea un enfoque estructurado sobre las tareas realizadas para alcanzar los objetivos de la investigación centrada en la Formación Centenario.

## 5.1 Análisis de *cutting*

Se realizó un análisis de *cutting* en laboratorio para caracterizar las litologías presentes en la Formación Centenario, con el objetivo de identificar los principales niveles permeables y sellos en la unidad. El *cutting* analizado, proporcionado por YPF, corresponde al pozo EFO-1037(d) y abarca profundidades entre 1.195 y 2.020 m. Las observaciones se llevaron a cabo en una oficina dentro de las instalaciones de YPF en la ciudad de Neuquén. Para este análisis se emplearon herramientas de laboratorio como lupa binocular, vidrio reloj, pinzas, escala granulométrica, ácido clorhídrico, agua, entre otros (Fig. 12).

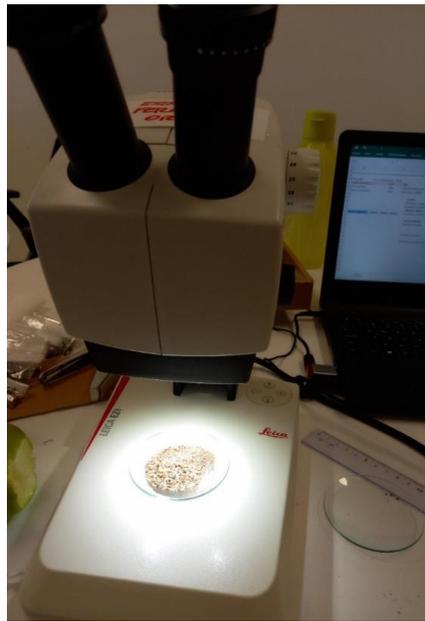


Figura 12. En la imagen se observa la lupa binocular con el *cutting* sobre el vidrio reloj para su observación.

## 5.2 Interpretación de registros y cálculos petrofísicos

Se recopiló y analizó material bibliográfico y registros de pozo para obtener una comprensión integral sobre la sedimentología, estratigrafía y marco estructural de la Formación Centenario dentro de la cuenca Neuquina. Este proceso incluyó la interpretación de los registros de pozo y su aplicación en la caracterización de reservorios utilizando el *software* tNavigator, lo que implicó realizar cálculos específicos para determinar propiedades petrofísicas, tales como porosidad y volumen de arcilla. Con esta base, se realizó la correlación entre registros de pozo y la posterior confección de mapas estructurales, isopáquicos y de isopropiedades.

## 6 CONFECCIÓN DEL MODELO

Para el trabajo se utilizó el *software* tNavigator (Rock Flow Dynamics, 2024), desarrollado por Rock Flow Dynamics (Fig. 13), el cual es una herramienta empleada para la generación del modelado estático y dinámico de yacimientos. La misma nos permite realizar gran variedad de operaciones geológicas claves, desde el análisis estratigráfico y sedimentario, hasta el modelado de fracturas, facies y propiedades petrofísicas de las formaciones. La empresa Rock Flow Dynamics, en conjunto con YPF, nos ha facilitado las licencias de dicho *software* para la realización del trabajo.

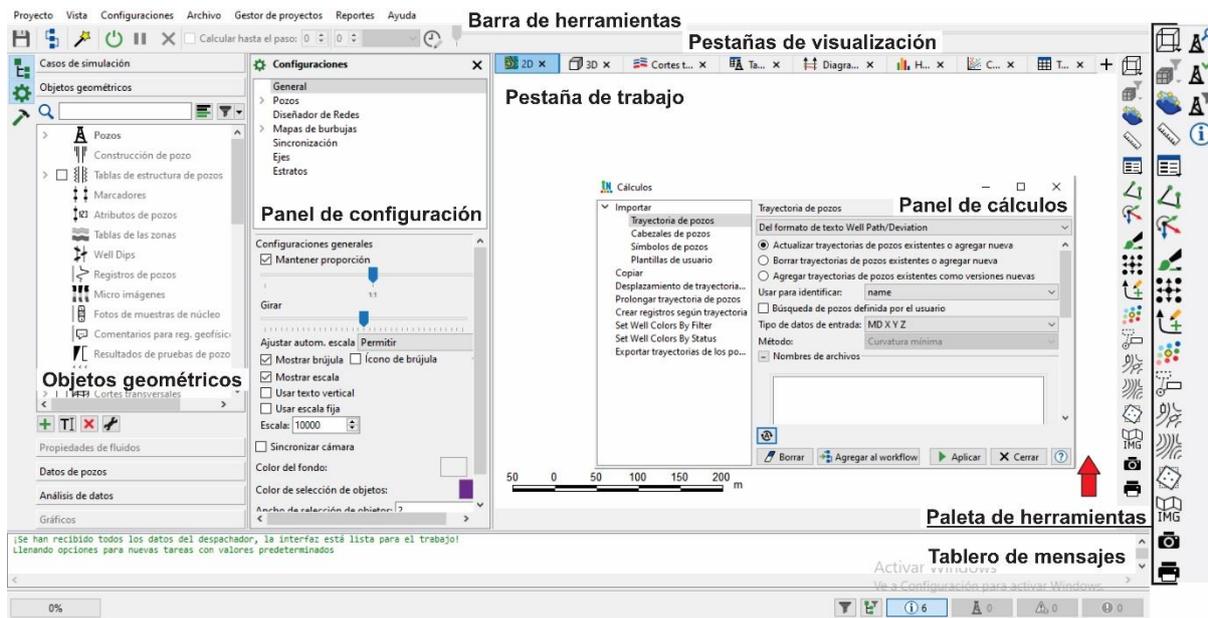


Figura 13. Ventana de trabajo de tNavigator y cada una de sus partes.

Contamos con una base de datos previa, la cual comprende un total de 188 pozos verticales y dirigidos, pertenecientes al yacimiento EFO, y tres superficies definidas para los topes de las formaciones Rayoso, Centenario y Loma Montosa. Con el fin de optimizar el análisis y asegurar la fiabilidad de los resultados, se implementó un proceso de filtrado de los pozos (Fig. 14).

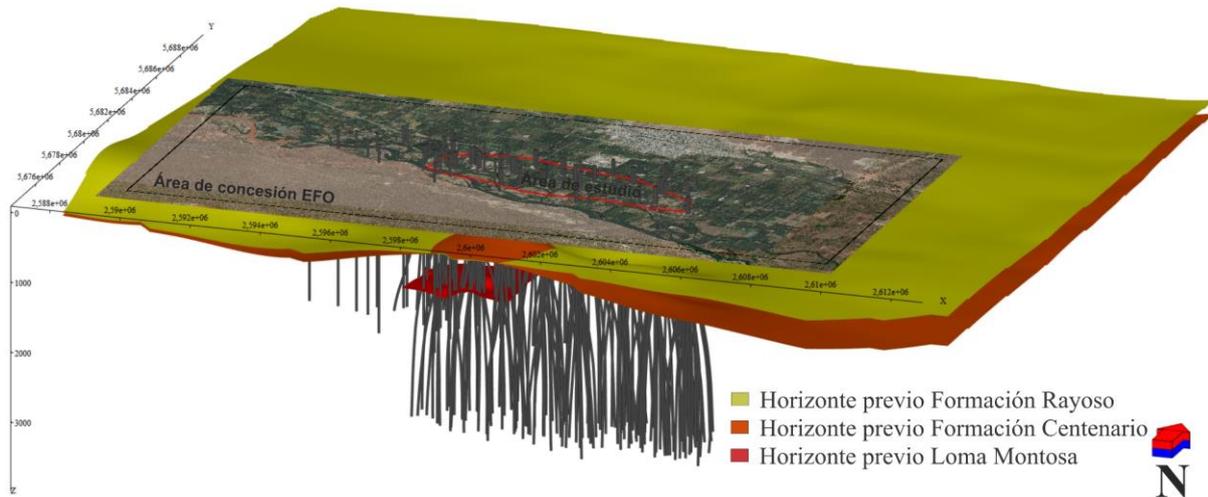


Figura 14. Información previa, la cual incluye horizontes y pozos con sus respectivas trayectorias.

Cada uno de los pozos cuenta con información de trayectoria, registros de pozo y datos de control geológico. Los datos de trayectoria de cada pozo se cargaron en formato de Well Path/Deviation y su tipo de entrada está dada en profundidad *measured depth* (en adelante MD) y posición geográfica X, Y y Z. Se corroboró la correcta posición geográfica de los pozos a utilizar, acompañado de imágenes satelitales del área de estudio. La profundidad puede estar representada como MD o *true vertical depth sub sea* (en adelante TVDss), siendo MD la medida total de la longitud de la trayectoria del pozo, mientras que TVDss es la medida de la profundidad vertical respecto del nivel del mar (Fig. 15).

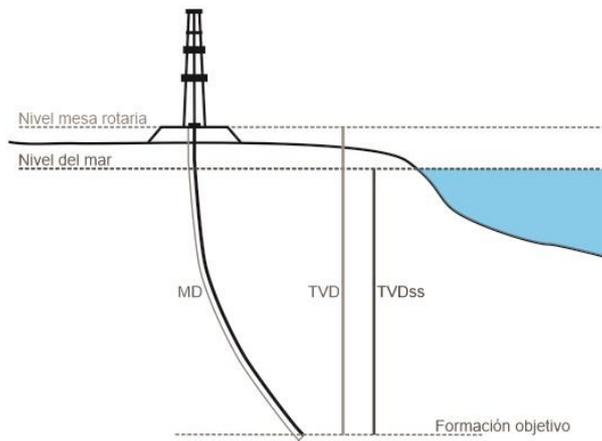


Figura 15. Ejemplo de los distintos tipos de medición de la profundidad.

En primera instancia, se seleccionaron aquellos pozos que atravesen los tres horizontes, lo cual nos asegura que se extiendan a lo largo del intervalo de interés (Formación Centenario). El yacimiento EFO tiene una gran extensión, sin embargo, la cantidad de pozos no alcanzan a cubrir toda el área. Para ello, se definió un área de estudio que tiene una extensión menor para que los cálculos obtenidos a partir de los registros de pozo sean más representativos (Fig. 16).

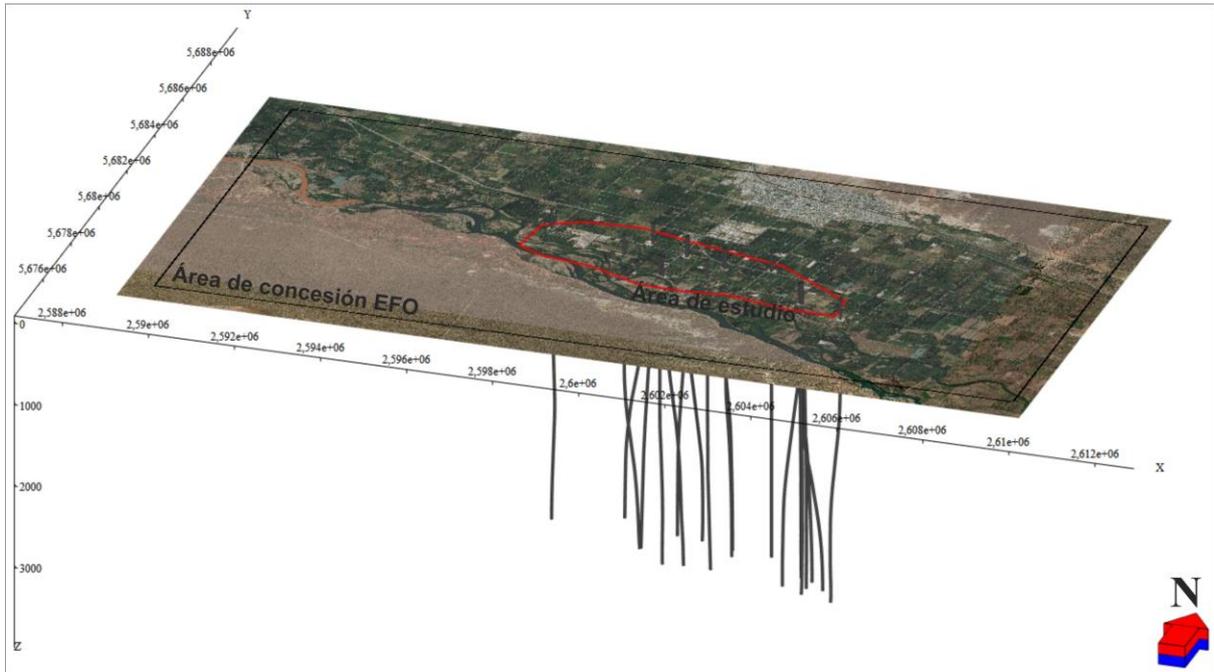


Figura 16. Pozos seleccionados dentro del área de estudio.

De cada pozo podemos acceder a información directa e indirecta, según estén disponibles. La información directa se corresponde a las muestras del *cutting* y la descripción de este, mientras que la indirecta se corresponde con los registros de pozo y sísmica. Los datos de registros de pozo fueron cargados en formato LAS y contienen las curvas de rayos gama (GR), potencial espontáneo (SP), resistividad, densidad, neutrón, sónico, entre otros (Fig. 17).

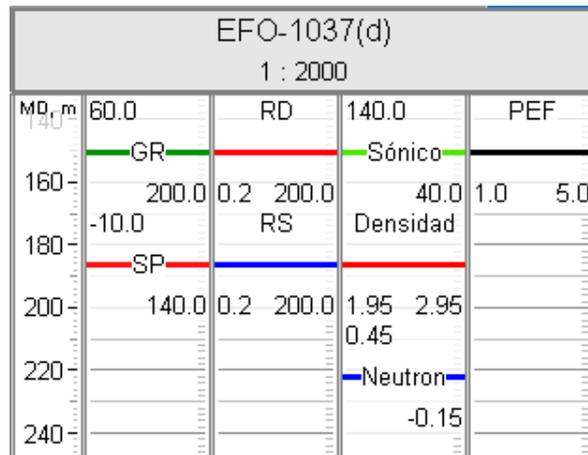


Figura 17. Ejemplo de registro eléctrico con las distintas curvas empleadas.

Se realizó un filtro seleccionando los pozos que contaban con datos de gas total, lo que indica la presencia de información del control geológico. De esta manera, se seleccionaron aquellos que se encuentren dentro del área de estudio. En la Tabla 1 se observa una lista de 60 pozos con datos de control geológico y registros de pozo.

Nombre de pozo	Registros de pozos								
	Gas Total	Control Geológico	GR	SP	RS	RD	Densidad	Neutron	Sónico
EFO-102(d)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
EFO-1037(d)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
EFO-121(d)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
EFO-130(d)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
EFO-147(d)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
EFO-156(d)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
EFO-224(d)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
EFO-231(d)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
EFO-232(d)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
EFO-242(d)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
EFO-243(d)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
EFO-245(d)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
EFO-250(d)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
EFO-251(d)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
EFO-253(d)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
EFO-262(d)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
EFO-303	X	X	X	X	X	X	X	X	X
EFO-45Bis	X	X	X	X	X	X	X	X	X
EFO-92	X	X	X	X	X	X	X	X	X
EFO-100(d)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
EFO-103(d)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
EFO-104(d)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
EFO-106(d)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
EFO-111	X	X	X	X	X	X	X	X	X
EFO-112(d)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
EFO-113(d)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
EFO-114(d)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
EFO-115(d)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
EFO-116(d)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
EFO-117(d)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
EFO-118(d)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
EFO-119(d)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
EFO-120(d)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
EFO-122(d)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
EFO-123(d)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
EFO-124(d)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
EFO-125(d)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
EFO-128(d)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
EFO-132(d)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
EFO-139(d)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
EFO-140(d)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
EFO-143(d)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
EFO-144(d)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
EFO-148(d)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
EFO-149(d)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
EFO-161(d)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
EFO-220(d)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
EFO-221(d)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
EFO-222(d)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
EFO-227(d)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
EFO-236(d)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
EFO-237(d)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
EFO-240(d)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
EFO-241(d)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
EFO-61bis	X	X	X	X	X	X	X	X	X
EFO-85	X	X	X	X	X	X	X	X	X
EFO-90(d)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
EFO-96(d)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
EFO-72			X	X	X	X	X	X	X
EFO-76			X	X	X	X	X	X	X

Tabla 1. En la tabla se nombran los 60 pozos seleccionados con datos de control geológico y registros de pozo.

Como se mencionó anteriormente, cada pozo contiene información perteneciente a registros de pozo y control geológico, principalmente. Sin embargo, muchos de estos pozos no han tenido a la Formación Centenario como el principal objeto de estudio, por ende, no todos

presentan datos sobre el intervalo de interés. Muchos de los pozos tienen como objetivo formaciones geológicas más profundas, por lo tanto, las curvas de los registros de pozo y/o la descripción de *cutting* no suelen estar presentes sobre la Formación Centenario. Cada uno de estos 60 pozos contienen datos de SP, GR y resistividad sobre la zona de interés.

El perfil de densidad, neutrón y sónico están disponibles, pero no todos contienen las tres curvas, sino que algunos suelen tener uno o dos de esos registros. Sin embargo, pueden correlacionarse de igual manera utilizando las demás curvas disponibles. En la Figura 18 se muestra un ejemplo de la disponibilidad de datos en los registros, específicamente el registro de densidad, donde se observa que el pozo EFO-102(d) carece de dicha curva, mientras que el pozo EFO-90(d) dispone de ella a lo largo de toda su extensión.

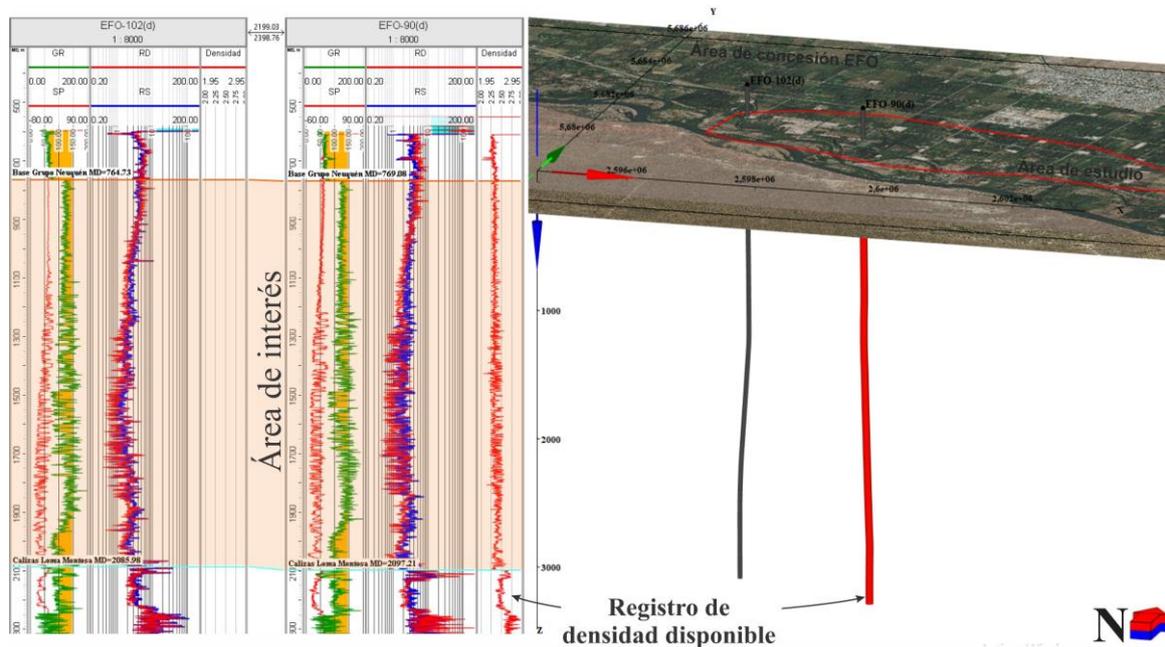


Figura 18. Ejemplo de los pozos EFO-102(d) y EFO-90(d) donde podemos observar que algunos cuentan con distintas curvas con información sobre la zona de interés.

Finalmente, los 60 pozos seleccionados constituyen una base de datos robusta y representativa, que incluye la mayoría de los *tracks* con información relevante sobre la formación de interés. Las tareas principales incluyen la definición del tope del Miembro Centenario Superior, así como el tope y la base del Miembro Centenario Inferior, la correlación de marcadores en todos los pozos, el cálculo de atributos y propiedades petrofísicas, y la elaboración de mapas estructurales e isopáquicos. A continuación, se presentan los fundamentos teóricos de los elementos que conforman la caracterización del reservorio.

## 6.1 Registros de pozos

Un registro de pozo, también llamado perfil, es la medición de propiedades físicas de la columna sedimentaria atravesada por el sondeo en función de la profundidad. Los perfiles permiten determinar la profundidad y el espesor de los estratos de interés, su mineralogía y propiedades petrofísicas, el tipo de fluidos presentes en los poros, la presión de formación, la presencia de fracturas y la geometría del pozo, entre otras informaciones útiles para el manejo del yacimiento (Khatchikian, 2011). Estos registros nos permiten obtener parámetros de las rocas, tales como la radiactividad natural, potencial natural o espontáneo (SP), resistividad, velocidad de propagación de las ondas, contenido de hidrógeno, densidad electrónica, entre otros. Observar e interpretar las curvas de los registros en su conjunto nos permite traducir estos parámetros medibles en parámetros petrofísicos deseados, como porosidad, permeabilidad, saturación de fluidos, arcillosidad y litología. La Figura 19 muestra un ejemplo de una sección del perfil del pozo EFO-1037(d), el cual fue seleccionado como *key well*, donde podemos observar el nombre del mismo y la escala numérica en el encabezado principal. Por otra parte, los tracks tienen un segundo encabezado que muestra el tipo de curva, color, trazo y los límites de las mediciones. Generalmente en el primer track se coloca la profundidad (en MD en este caso), el GR-SP (caliper en caso de estar disponible) en el segundo, la resistividad en el tercero (en escala logarítmica), agregándose luego las curvas que se deseen.

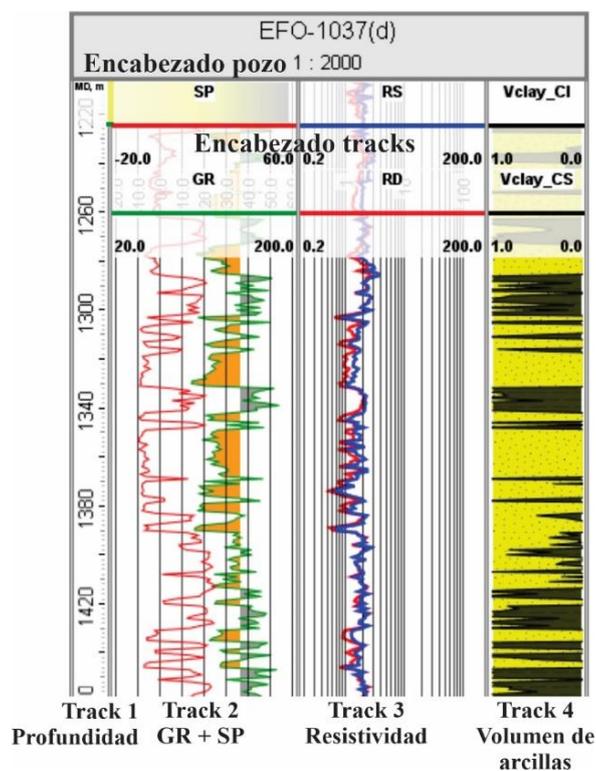


Figura 19. Ejemplo de registro de pozos con distintas curvas.

### **6.1.1 Tipos de perfiles**

#### **6.1.1.1 Registro de potencial espontáneo**

Esta herramienta está constituida por un electrodo ubicado en superficie y otro electrodo móvil dentro del pozo, y su registro consiste en la lectura de un fenómeno físico que ocurre naturalmente en el pozo por la interacción entre el agua de formación, el fluido de perforación y las lutitas (Khatchikian, 2011). La diferencia de salinidad entre el agua de formación y el filtrado de lodo de perforación genera pequeños voltajes inducidos por corrientes eléctricas que ocurren cerca de la pared del pozo en formaciones donde se produce invasión, proceso donde el filtrado de lodo entra en los poros de la roca y desplaza al fluido existente en la formación.

El registro de SP es importante en formaciones silicoclásticas (Fig. 20A), ya que permite diferenciar entre rocas porosas y permeables de rocas no permeables, definidas por areniscas/conglomerados y arcilitas, respectivamente, por lo tanto, es un excelente indicador cualitativo de capas permeables. Además, es útil para delimitar capas, correlación de pozos, determinación de la resistividad del agua de formación ( $R_w$ ) y para obtener valores de arcillosidad de la capa. El voltaje registrado por la herramienta está expresado en mV, pero la lectura e interpretación de formaciones permeables y no permeables, se realiza analizando las deflexiones tomando como referencia la línea base de arcillas (roca impermeable) y la línea base de arenas “limpias” (roca permeable). Además, esta deflexión del SP puede ser hacia la izquierda o hacia la derecha, según el contraste de salinidad entre el agua de formación y el lodo de perforación. Si el agua de formación presenta una salinidad mayor al lodo, la deflexión será hacia la izquierda, mientras que, si el lodo es más salino, la deflexión será hacia la derecha.



Figura 20. A) Ejemplo de las respuestas de las herramientas de GR y SP frente a diferentes litologías (Modificado de Casadío y Montagna, 2015). B) Ejemplo de registro real de GR y SP donde se observa su respuesta frente a areniscas y arcillas.

#### 6.1.1.2 Registro de rayos gamma

El registro de rayos gamma (GR) es una medición de la radiactividad natural de las rocas. La radiación gamma natural se genera en las rocas por el decaimiento de isótopos radiactivos de uranio, torio y potasio. En las formaciones sedimentarias, el registro refleja el contenido de arcilla porque los elementos radiactivos tienden a concentrarse en arcillas y lutitas (Fig 20B). Las calizas generalmente tienen un nivel muy bajo de radiactividad, mientras que las areniscas pueden ser poco o muy radiactivas dependiendo de su contenido de feldespatos alcalinos y micas (Khatchikian, 2011) (Fig. 21).



Figura 21. Registro de la lectura relativa del registro de rayos gamma frente a diferentes litologías (Tomado de Montagna y Astesiano, 2015). La unidad API es una unidad de radioactividad utilizada para los registros de rayos gamma naturales.

### 6.1.1.3 Registros de resistividad

La resistividad de la formación es la capacidad que tiene la misma para oponerse al paso de corriente eléctrica y es el inverso de la conductividad. Este parámetro nos permite obtener información sobre el tipo de fluido presente en la formación, ya que depende de la salinidad del fluido presente en los poros de la roca. Una roca con agua de formación salina será conductiva y opondrá poca resistencia al paso de la corriente, por lo tanto, tendremos una lectura de baja resistividad por parte de la herramienta (Fig. 22A). Por otra parte, si tenemos la presencia de hidrocarburos (gas o petróleo) la resistividad leída por la herramienta será muy alta debido a la baja conductividad de estos fluidos. Otro ejemplo es el de rocas compactas poco porosas como las calizas masivas, las cuales presentan resistividades altas (Fig. 22B).

#### 6.1.1.4 Registro de densidad

El registro de densidad es parte de los perfiles radiactivos utilizados para caracterizar formaciones geológicas. Funciona mediante una sonda que incorpora una fuente radiactiva de cesio, la cual emite rayos gamma de mediana energía. Estos rayos interactúan con los electrones de la formación, perdiendo energía en el proceso en una cantidad proporcional a la densidad electrónica del material, permitiendo así determinar la densidad de la formación. Este método es especialmente útil para calcular la porosidad de la roca, aunque también proporciona información valiosa sobre la matriz de la roca y el tipo de fluido presente en los poros. Cuando se combina con otros perfiles, como el neutrón y el sónico, el registro de densidad puede ayudar a estimar el volumen de arcilla, detectar la presencia de gas, identificar minerales y evaluar propiedades mecánicas de las rocas (Khatchikian, 2011).

Las lecturas del registro de densidad se expresan en gramos por centímetro cúbico ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ ) y a menudo se presentan en la misma pista que el perfil neutrón, aunque las interpretaciones deben realizarse de manera inversa debido a los diferentes comportamientos frente a diversas capas. Por ejemplo, en las capas arcillosas, el registro muestra una densidad aparente mayor de lo real, debido a que las arcillas presentan una mayor densidad electrónica causada por la compactación. Esto da lugar a una lectura de porosidad que es menor a la real. En contraste, en las capas gasíferas, la densidad registrada es menor porque el gas tiene una densidad extremadamente baja (alrededor de  $0.0001 \text{ gr}/\text{cm}^3$ ), resultando en una porosidad aparente que es mayor que la real (Fig. 23).

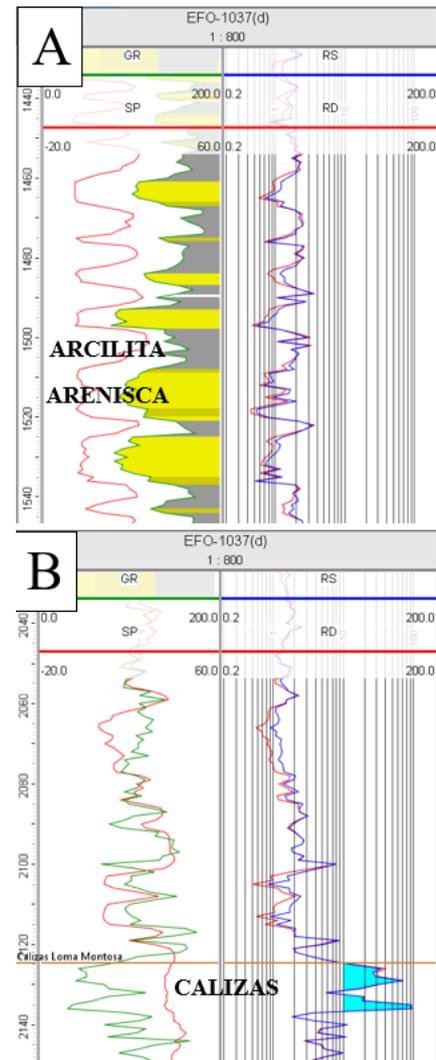


Figura 22. Ejemplos reales de lectura de resistividad en capas A) silicoclásticas y frente a B) calizas.

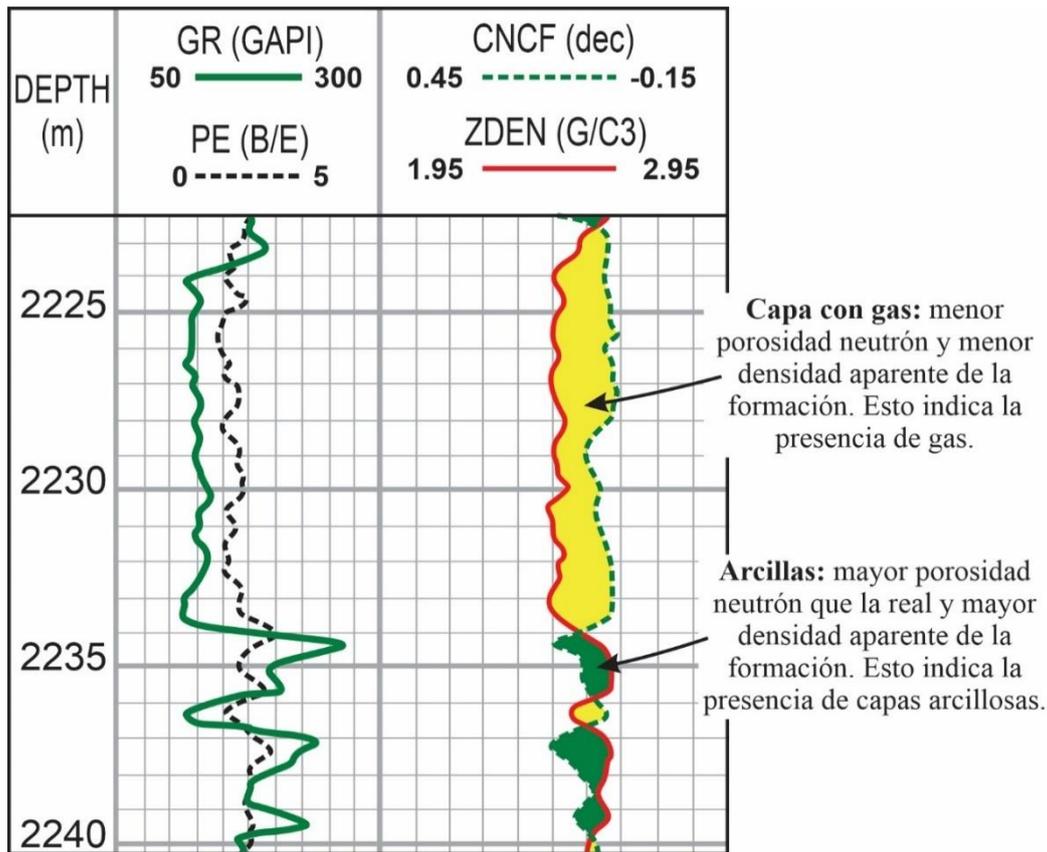


Figura 23. Determinación de capa con gas y arcillas mediante la interpretación del cruce de las curvas densidad-neutrón (Modificado de Montagna y Astesiano, 2015). La curva de gamma ray (GR) está en unidades GAPI, o grados API, medida de la radiactividad natural de las rocas. La curva de densidad (ZDEN) está en gramos por centímetro cúbico (g/cm<sup>3</sup>), utilizada para evaluar la compactación y mineralogía. La porosidad neutrón (CNCF) se expresa en decimales, indicando el porcentaje de hidrógeno en el volumen de roca, y la curva del perfil fotoeléctrico (PE) se mide en barnes por electrón (B/E), útil para distinguir entre litologías.

#### 6.1.1.5 Registro neutrónico

El registro neutrónico es otra herramienta esencial en los perfiles radiactivos, pero a diferencia del registro de densidad, se centra en medir la cantidad de hidrógeno en las formaciones geológicas. Esto se logra a través de una fuente de Am-Be que emite neutrones de alta velocidad. Estos neutrones colisionan con los núcleos de los átomos en la formación, disminuyendo su energía progresivamente hasta alcanzar un estado conocido como "termal". En este estado, los neutrones son capturados por los núcleos de hidrógeno, los cuales se excitan y emiten rayos gamma característicos que son detectados por un contador *Geiger* o un contador centellante (Khatchikian, 2011).

El perfil neutrónico, al igual que el de densidad, puede reflejar una porosidad aparente en ciertas condiciones. En las capas arcillosas, la lectura de porosidad suele ser mayor a la real debido a la elevada concentración de hidrógeno, no solo por el agua en la formación, sino también por los oxidrilos (OH<sup>-</sup>) que forman parte de la estructura de las arcillas (Khatchikian,

2011) (Fig. 24). En cambio, en las capas gasíferas, la porosidad registrada es menor que la real porque los átomos de hidrógeno están más dispersos, afectando la respuesta de la herramienta.

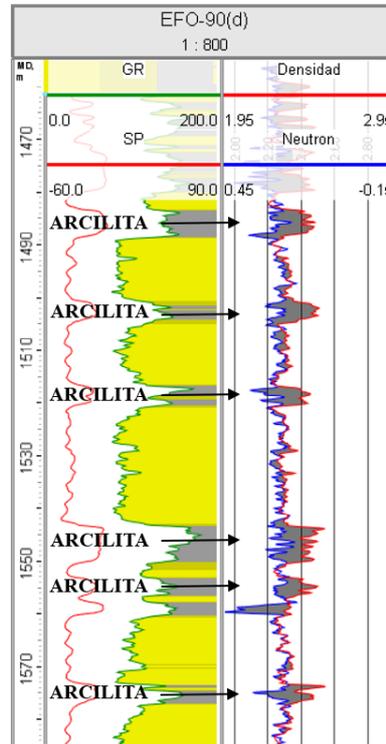


Figura 24. Respuesta de las curvas densidad-neutrón frente a capas arcillosas.

#### 6.1.1.6 Registro sísmico

El registro sísmico, también llamado acústico, mide el tiempo que emplea una onda acústica para atravesar un pie de formación, lo que se denomina tiempo de tránsito. La medición del mismo se expresa en  $\mu\text{s}/\text{pie}$ . La aplicación más importante del registro sísmico es determinar la porosidad de las rocas atravesadas por el pozo, a partir del tiempo de tránsito de las ondas. Si el retardo de la onda es mayor, esto indica una menor proporción de matriz en la roca, por lo tanto, la porosidad será mayor.

## 6.2 Propiedades petrofísicas

La evaluación de formaciones o caracterización petrofísica está enfocada en el estudio de las propiedades físicas del medio poroso, los cuales permiten interpretar sus propiedades petrofísicas, en función de sus componentes y características petrográficas (poros y fisuras, uniones intergranulares, anisotropías, mineralogía, entre otros). Las propiedades físicas de una roca controlan sus características relacionadas a la resistencia, deformación y productividad, en el caso de reservorios, las cuales son el resultado de su génesis, su mineralogía, sus condiciones y procesos geológicos y tectónicos que actuaron sobre la roca a lo largo de su historia. Los parámetros petrofísicos necesarios para definir el potencial de almacenamiento de

un reservorio son el volumen de arcilla, la litología, la porosidad, la permeabilidad y la saturación de agua (Garduza Rueda, 2019). Si bien estos valores no se pueden obtener en forma directa, es posible estimarlos a partir del análisis de registros de pozo y/o laboratorios.

### 6.2.1 Volumen de arcilla

El volumen de arcilla es el porcentaje neto de arcillas presentes en la formación. Las arcillas son sedimentos clásticos de grano extremadamente fino, de elevada plasticidad, compuesto principalmente por partículas de tamaño arcilla (menor a 1/256 mm) y coloidales, con un considerable contenido en minerales de arcilla (aluminosilicatos hidratados formados principalmente por la alteración o meteorización de minerales silicáticos primarios como feldespatos, anfíboles y piroxenos) y cantidades subordinadas de minerales como cuarzo, feldespatos, carbonatos, materia orgánica, entre otras impurezas.

El cálculo de volumen de arcilla se realizó utilizando el registro de rayos gamma que, como ya se definió, lee la radiactividad natural de las rocas, energía liberada principalmente por isótopos de uranio, torio y potasio, los cuales tienden a concentrarse en las arcillas. Para su cálculo utilizamos la Ecuación 1:

*Ecuación 1.* Cálculo volumen de arcilla a partir de valores de GR.

$$Vcl_{GR} = \frac{GR_{log} - GR_{arena}}{GR_{arcilla} - GR_{arena}}$$

Donde  $GR_{log}$  es la lectura del registro de rayos gamma,  $GR_{arena}$  es el valor más pequeño leído por la herramienta de GR (equivalente a arena “limpia”) y  $GR_{arcilla}$  es el valor definido en el punto de mayor arcillosidad (Fig. 25). Dichos valores, de mayor y menor arcillosidad fueron corroborados con datos de control geológico a fin de garantizar la fiabilidad del dato.

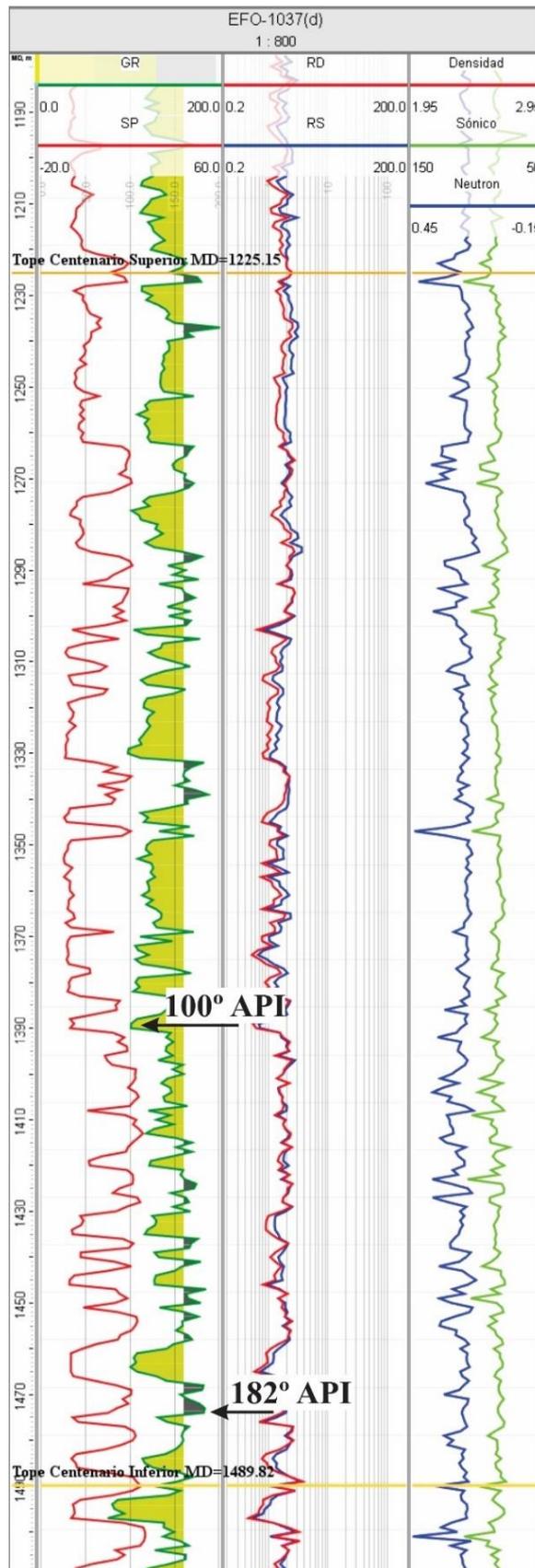


Figura 25. Ubicación de los puntos de menor y mayor lectura de GR, los cuales se utilizaron para el cálculo del volumen de arcilla.

### 6.2.2 Porosidad

La *porosidad* se define como el volumen de poros por unidad de volumen de roca. Como los poros están ocupados por fluidos, puede definirse la porosidad como la fracción del volumen total de una muestra que es ocupada por fluidos (Khatchikian, 2011). En la Ecuación 2, la porosidad es adimensional y menor a 1, aunque también suele expresarse en porcentaje.

Ecuación 2

$$\phi = \frac{\text{Volumen de muestra}}{\text{Volumen de roca}}$$

La porosidad de la roca suele clasificarse en *primaria* y *secundaria*. La porosidad primaria se forma durante los procesos sedimentarios que originaron el reservorio, relacionada a la matriz de la roca o suelo, y la porosidad secundaria puede ser debida a fenómenos secundarios de disolución o a controles regionales de fracturamiento (Freeze y Cherry, 1979). La porosidad también puede clasificarse como *efectiva* o *total*. La efectiva es aquella que comprende los poros interconectados, mientras que la porosidad total es la que comprende a todos los poros de una muestra, tanto los interconectados como los poros aislados (Fig. 26).

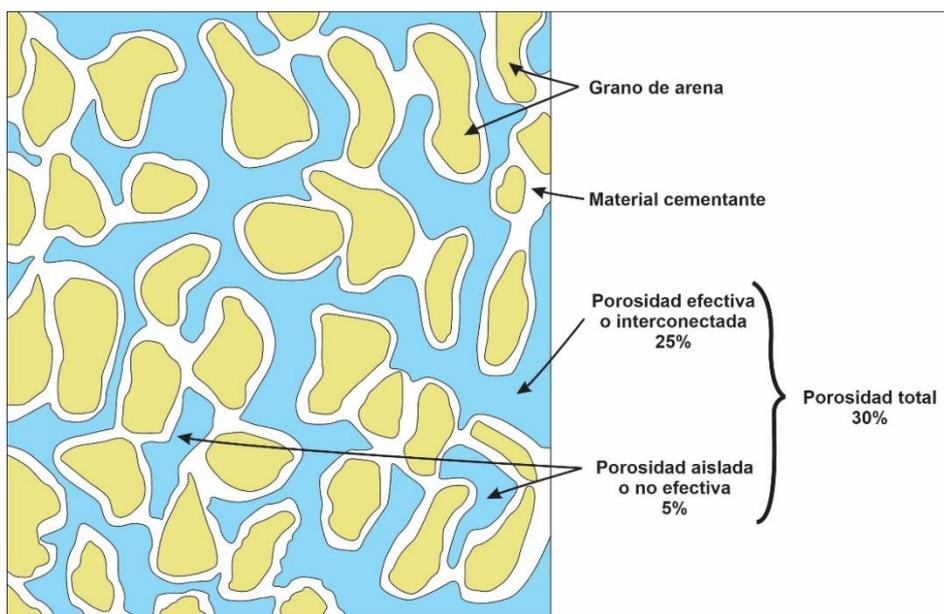


Figura 26. Esquema de los tipos de porosidad presentes en rocas clásticas.

Se realizó el cálculo de las porosidades total y efectiva, para ello, se utilizaron las siguientes ecuaciones:

Ecuación 3. Ecuación para el cálculo de la porosidad total

$$\phi_{\text{sónico}} = \frac{\Delta t_{\text{log}} - \Delta t_{\text{matriz}}}{\Delta t_{\text{fluido}} - \Delta t_{\text{matriz}}}$$

Ecuación 4. Ecuación para el cálculo de la porosidad efectiva. 
$$\Phi_{sónico} = \left( \frac{\Delta_{log} - \Delta_{matriz}}{\Delta_{fluido} - \Delta_{matriz}} \right) - (V_{cl} * \Phi_{sónico_{cl}})$$

En la ecuación 3  $\Delta_{t_{log}}$  es la lectura del registro sónico en  $\mu\text{s}/\text{pie}$  en la profundidad donde se quiere estimar la porosidad,  $\Delta_{t_{matriz}}$  es el tiempo de tránsito de la matriz (aproximadamente  $55 \mu\text{s}/\text{pie}$  en areniscas) y  $\Delta_{t_{fluido}}$  es el tiempo de tránsito del fluido de perforación ( $189 \mu\text{s}/\text{pie}$  para lodos base agua dulce), utilizada para el cálculo de la porosidad total. Por otra parte, en la ecuación 4 empleada para el cálculo de la porosidad efectiva debe tenerse en cuenta el efecto de las arcillas, donde  $V_{cl}$  es el volumen de arcilla y  $\Phi_{sónico_{cl}}$  es la porosidad aparente del sónico en arcillas. Para definir  $\Phi_{sónico_{cl}}$  debemos buscar el punto de mayor arcillosidad en la formación y calcular la porosidad total en ese punto, para luego agregarlo en la Ecuación 4.

En el software, la ecuación 3 se ingresa en la ventana de “Cálculos” (Fig. 27) para obtener la porosidad total de la formación.

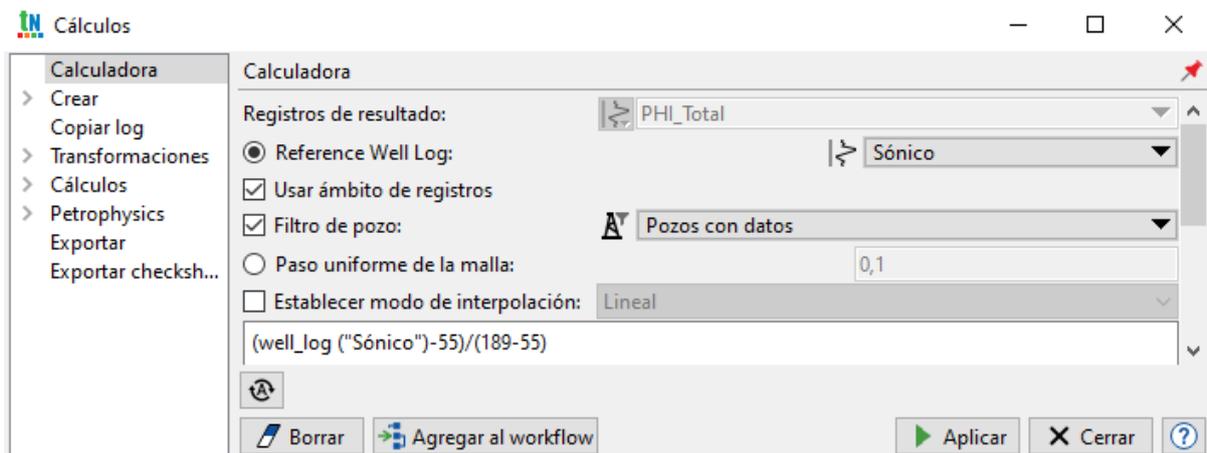


Figura 27. Ventana "cálculos" con la Ecuación 3 ingresada. Véase que "well\_log ("Sónico")" se corresponde con el valor medido por la herramienta, mientras que 55 y 189  $\mu\text{s}/\text{pie}$  se corresponden con el tiempo de tránsito en la matriz y el fluido de perforación, respectivamente.

Para el cálculo de la porosidad efectiva se ingresa la porosidad total calculada anteriormente (“PHI\_Total”), agregando el efecto de la arcilla, el cual comprende los valores de volumen de arcilla calculados en la formación (“VcCS”) y la porosidad calculada para el punto de mayor arcillosidad (Fig. 28). De este modo se obtiene un nuevo registro con las curvas representativas para los valores de porosidad total y efectiva (Fig. 29).

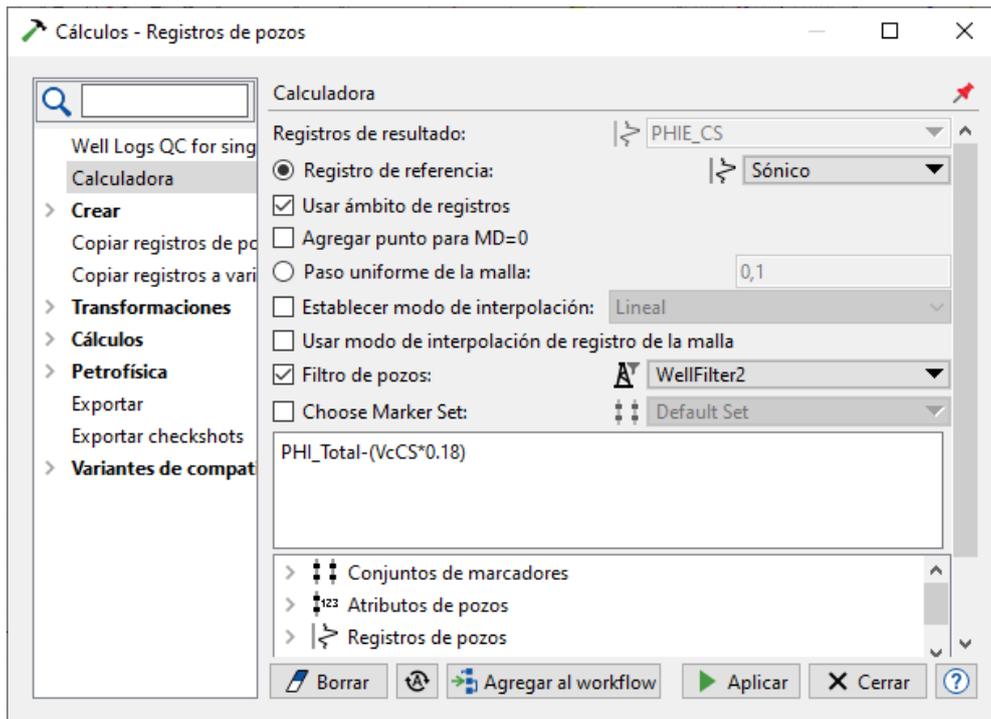


Figura 28. Se ingresa la ecuación 4 para calcular la porosidad efectiva.

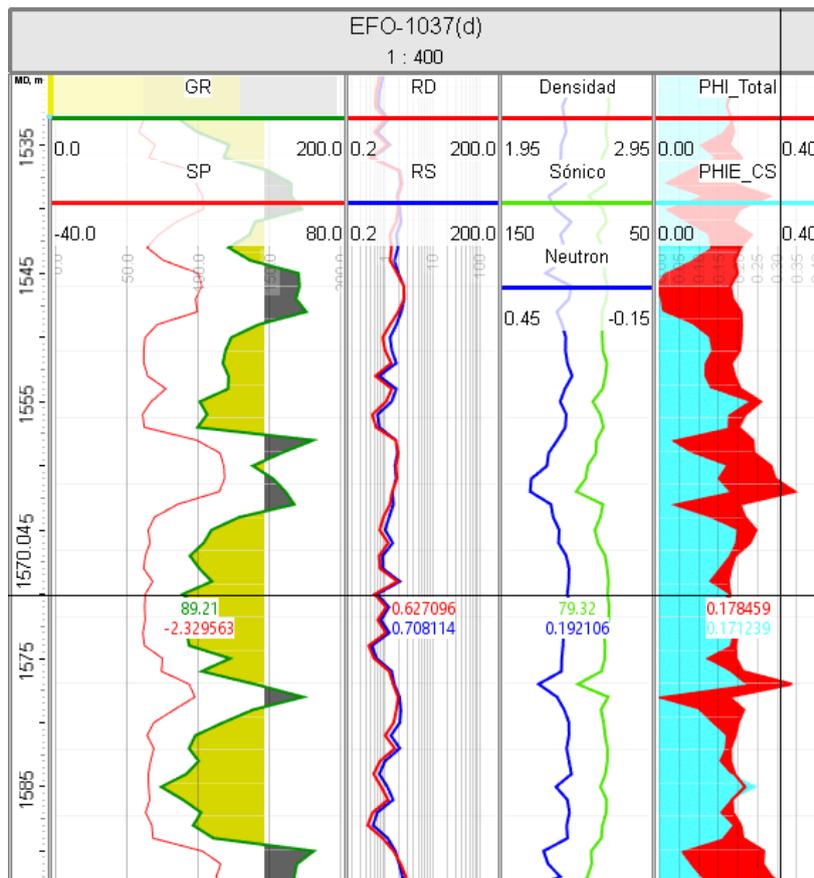


Figura 29. Curva generada de porosidad total (rojo) y efectiva (celeste).

### **6.2.3 Permeabilidad**

La permeabilidad es la medición de la facilidad con que los líquidos fluyen a través de una roca. La roca debe tener fracturas, capilares o poros interconectados para ser permeable, por lo que existe una relación entre la porosidad efectiva y la permeabilidad, aunque no siempre es directamente proporcional. Existen ciertas rocas, como las lutitas, que tienen alta porosidad total, pero muy baja porosidad efectiva que se traduce en muy baja a nula permeabilidad, lo que las caracteriza como roca sello. Otras rocas, como las calizas, pueden tener baja porosidad, pero la presencia de pequeñas fracturas de gran extensión les da una alta permeabilidad (Garduza Rueda, 2019).

### **6.2.4 Saturación de fluidos**

La saturación de un fluido dentro de la roca es el volumen poral que está ocupada por dicho fluido. Es adimensional y menor a 1, pudiéndose expresar en porcentaje, y en el caso del agua, con valores de saturación que varía entre 100% y hasta un valor muy pequeño, pero sin ser nula, ya que existe la presencia de agua connata o irreductible, que es el agua adherida a los granos por presión capilar, la cual no puede ser extraída. La saturación de agua es el volumen de poros que contienen agua y se representa como  $S_w$ , mientras que la saturación de petróleo y gas se identifican con  $S_o$  y  $S_g$ , respectivamente.

### **6.3 Descripción de cutting**

Cuando hablamos de *cutting*, hablamos de los recortes de roca obtenidos durante el proceso de perforación de un pozo. La disciplina que permite obtener estas muestras es el control geológico. Dicha labor permite evaluar cada una de las formaciones rocosas atravesadas por el trépano a partir de una serie de tareas llevadas a cabo en las cabinas de control geológico. Las tareas principales en una cabina son analizar el cutting, obtener muestras de los volátiles que puede tener una formación y monitorear demás parámetros que se llevan a cabo durante la perforación tales como, tasa de penetración (ROP), profundidad, datos de cromatografía, rastros y fluorescencia, litología porcentual e interpretada, descripción de muestras, datos del trépano, entre otros eventos que ocurran durante la perforación.

Las muestras de *cutting* fueron obtenidas desde el pozo EFO-1037(d) y puestas a nuestra disposición en bolsas transparentes correspondientes al intervalo desde los 1.150 m hasta los 2.050 m de profundidad. En la Fig. 30 se muestra el *cutting* representativo del intervalo comprendido entre los 1.490 m y los 1.550 m. Para su análisis la muestra se ubica dentro del vidrio reloj y debe verse húmeda para describirla, especialmente para definir el color. Existe un orden para realizar una correcta descripción del *cutting*, que es el siguiente:

- Tipo y clasificación de la roca: algunas de las rocas más comunes de observar:
  - Clásticas: conglomerados-areniscas-limolitas-arcilitas
  - Carbonáticas: calizas-dolomías
  - Evaporíticas: halita-yeso-anhidrita
  - Ígneas: basalto-pórfidos-granitos
- Color: se observa el color de la muestra húmeda, pudiendo agregar el color específico de ciertos componentes como color de grano o cristal, color del cemento, entre otros.
- Textura: son las características de cada elemento que constituye la roca (clastos, cristales y poros), como las relaciones entre los mismos, tanto cuantitativa como espacialmente. La textura incluye al tamaño, la forma, redondez y selección, por lo tanto, se utiliza un comparador granulométrico. Para el caso de muestras clásticas se especifican el tamaño de grano, redondez (muy angulosa, angulosa, subredondeada, redondeada), selección (mala, regular, buena); en el caso de arcilitas se observa su tipo de fractura (irregular, regular, blocosa, fisil, astillosa); mientras que en rocas carbonáticas se observa el tamaño y forma del cristal.
- Cemento: es el agregado químico que se deposita entre los granos y está constituido por cristales, que pueden ser silíceos, calcáreos, dolomíticos, yesífero o piríticos. Los mismos pueden clasificarse según el grado de consolidación, clasificándose como no consolidado, mal cementado, moderada cementación y bien cementado. Por otra parte, la matriz es el material de un tamaño menor al esqueleto de la roca detrítica, y que son

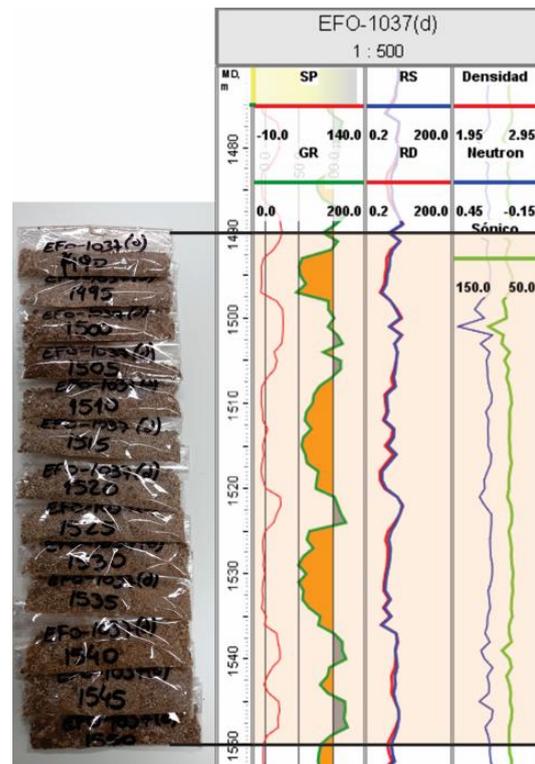


Figura 30. Ejemplo de muestras de *cutting* para el intervalo desde 1.490 m a 1.550 m seleccionadas para definir el tope del Miembro Centenario Superior.

mecánicamente depositados entre los granos, de forma depositacional o diagenética. La matriz puede ser arenosa, arcillosa, limosa, calcárea, dolomítica, ferruginosa, etc.

- La dureza hace referencia a la dureza total de la roca, por lo tanto, se puede clasificar como:
  - Suelta, friable o frágil.
  - Plástica, pobre o moderadamente compacta.
- La porosidad que podría observarse en rocas clásticas son integranular, por disolución de granos o por fracturas.
- Rastros de hidrocarburos, para los cuales se define su color (claros, oscuros, castaños, etc.), su cantidad (abundantes, pobres, aislados, impregnaciones) y su aspecto (frescos, semifrescos o secos).

La información obtenida a partir del análisis del *cutting* se trabajó en forma conjunta con los registros de pozo a fin de establecer los límites de la formación (marcadores) y para caracterizar las areniscas para los miembros Centenario Superior y Centenario Inferior.

#### **6.4 Facies y electrofacies**

Según la definición proporcionada por Reading y Levell (1996), una facies de roca es un cuerpo rocoso con características específicas, ya sea un estrato individual o un grupo de varios estratos. Debe ser una roca distintiva que se formó bajo ciertas condiciones de sedimentación, reflejando un proceso, conjunto de condiciones o ambiente particular. La identificación de facies se fundamenta en criterios como el color, la estratificación, la composición, la textura, los fósiles y las estructuras sedimentarias. Además, en subsuelo, como explican Reading y Levell (1996), se utilizan los registros de pozo para medir las propiedades eléctricas, radiactivas y acústicas de las rocas, a fin de obtener información sobre litología, tamaño de grano, densidad, porosidad y fluidos de los poros, dando lugar a lo que se denomina electrofacies. De este modo, se define una electrofacies como una capa o secuencia de capas de rocas que están representadas por una misma respuesta (cualitativa y/o cuantitativa) de los perfiles de pozo de pozos (Fig. 31). Este intervalo en profundidad presenta respuestas más o menos constantes, mientras que una electrosecuencia se puede definir como un intervalo de profundidad con una o más características que varía de manera continua, definidas como rampas (Serra, 1986). Dicho intervalo debe tener un espesor superior a la resolución vertical de la herramienta.

La interpretación de electrofacies nos permite identificar rocas reservorio y sello, para lo cual se creó un perfil de electrofacies clásticas que nos permite observar una descripción visual de las principales facies sedimentarias que se encuentran en la Formación Centenario y como varían en profundidad a lo largo del pozo o área de estudio. El perfil se calculó a partir de valores de referencia o umbral (*cut off*) para el volumen de arcilla, el cual indica el porcentaje del contenido de arcilla. Se definieron dos valores de *cut off*. El primero nos permite diferenciar las arenas limpias de las arenas arcillosas y el otro permite diferenciar a las arcilitas. A partir de los valores de *cut off*, las muestras se dividen en diferentes electrofacies clásticas según su contenido de arcilla.

Las electrofacies clásticas definidas son:

- Areniscas “limpias”: Tienen un contenido de arcilla ( $V_{clay} \leq 35\%$ ) y están compuestas principalmente por granos de arena, sin una cantidad significativa de materiales finos.
- Areniscas arcillosas o “sucias”: Tienen un contenido de arcilla  $\geq 35\%$  y  $\leq 45\%$ , lo que indica una importante cantidad de matriz de arcilla o partículas finas adheridas a los granos de arena.
- Arcilitas: Las muestras tienen un elevado contenido de arcilla, definido a partir de valores  $\geq 45\%$ .

Las curvas de SP y GR presentan formas características que pueden ser asociadas a una facies de un cuerpo arenoso particular (Fig. 32). Estos patrones se relacionan con variaciones granulométricas de los cuerpos, que, junto con la geometría de los cuerpos, pueden ser vinculados a un determinado modelo sedimentario. No obstante, es importante considerar que las herramientas de perfilaje miden propiedades físicas de las rocas (como la radiactividad o la conductividad), y no directamente sus propiedades texturales.

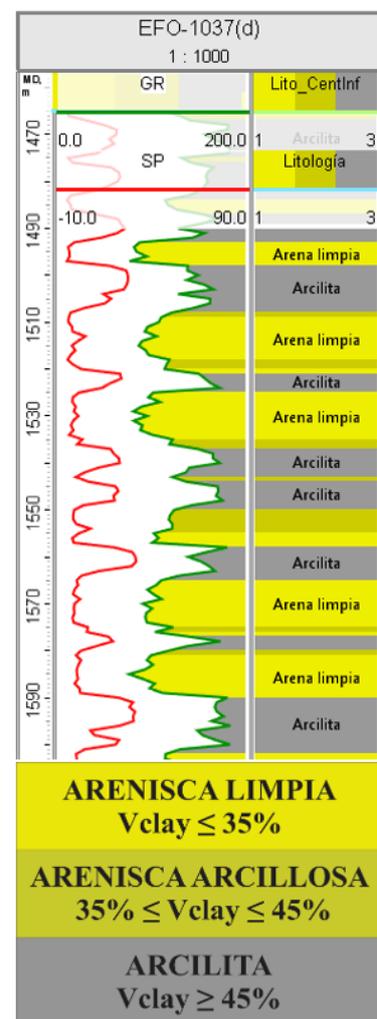


Figura 31. Definición de las tres electrofacies en los registros de pozo.

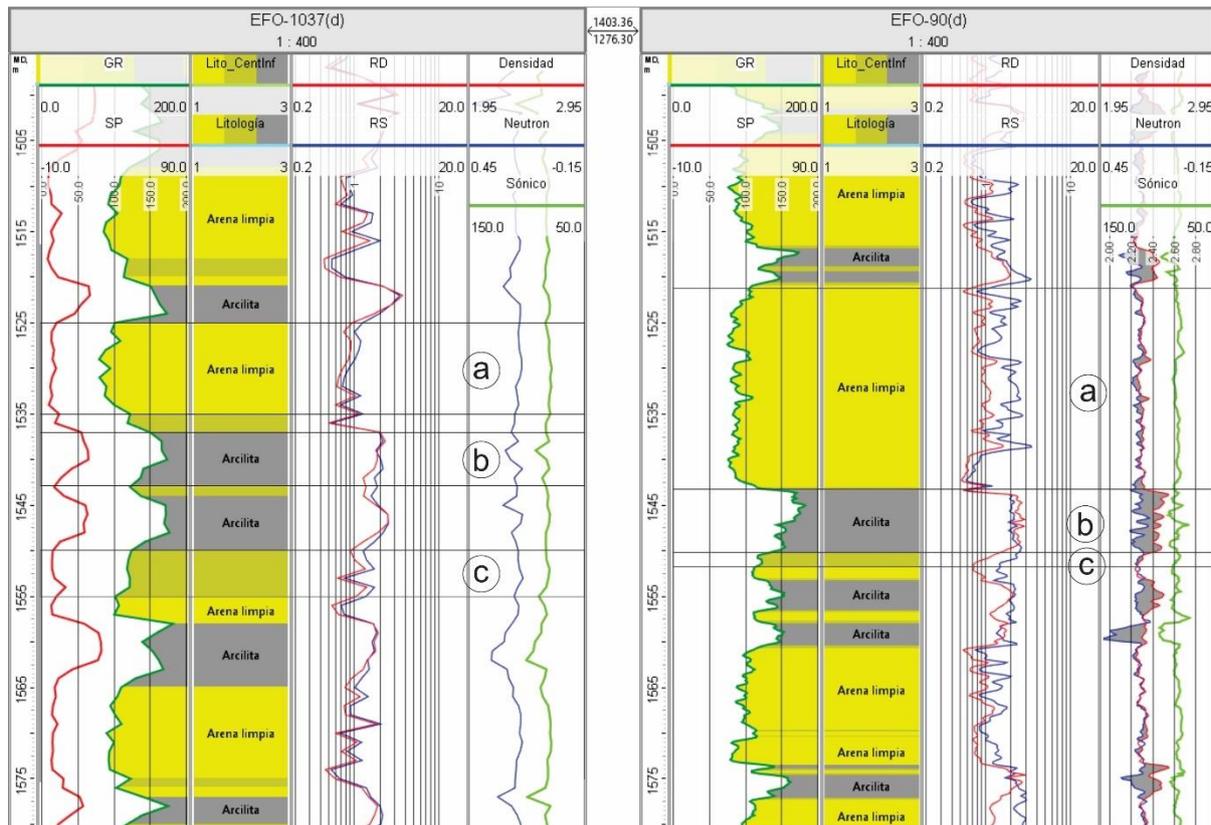


Figura 32. Clasificación de electrofacies según el patrón de las curvas de los perfiles: a) areniscas limpias, b) arcilitas y c) areniscas arcillosas.

Las areniscas presentan una clara diferencia en las curvas SP y GR frente a las arcilitas, donde las primeras presentan bajos valores de rayos gama, frente a los altos valores de radiactividad en las arcillas. La curva de SP presenta deflexión en capas porosas como las arenas, mientras que se mantiene sin deflexión frente a capas arcillosas.

Las areniscas limpias presentan valores bajos de resistividad a causa de la alta salinidad del agua de formación. También se observa una separación entre las curvas de resistividad profunda y somera, esto a causa de eventos de invasión en capas porosas. Otra diferencia en las respuestas de los registros está en las curvas de densidad-neutrón, las cuales están configurados para dar una respuesta características frente a las arcillas, donde la herramienta de neutrón muestra una porosidad aparente mayor y la herramienta de densidad muestra un aumento en los valores frente a capas arcillosas. Por su parte, las areniscas arcillosas presentan respuestas similares a las areniscas limpias, pero principalmente quedan definidas por el porcentaje de arcilla que contienen y su mayor lectura de GR respecto a las areniscas limpias.

## 6.5 Correlación de pozos

El control geológico es esencial en las etapas exploratorias y de desarrollo en la actividad hidrocarburífera, ya que permite evaluar en tiempo real cada una de las formaciones atravesadas durante la perforación de un pozo. Los datos proporcionados por YPF incluyen reportes de *mudlog*, que documentan los eventos que van ocurriendo durante la perforación y facilitan la correlación de la litología del *cutting* con los perfiles de pozo, así como las descripciones detalladas del *cutting* con sus respectivas profundidades.

Una de las primeras tareas de este trabajo consistió en analizar los datos de *cutting* para identificar la posición de los marcadores de la Formación Centenario y analizar la interpretación previa realizada por los geólogos. Dado que los marcadores de tope y base de la formación no están definidos para todos los pozos, se observaron cuáles eran las principales características litológicas que permitieron definirlos donde estaban presentes. La correlación entre registros de pozos consistió en comparar los patrones de las curvas que presentan los registros de pozo, como SP y GR, para identificar similitudes o cambios en el carácter y magnitud de las deflexiones de cada curva o traza, lo que permite observar la extensión lateral y definir los límites de la formación geológica de interés.

Para llevar a cabo la correlación de manera organizada, se utilizaron paneles de correlación, los cuales permiten conectar los registros de distintos pozos y obtener un trazo orientado. Inicialmente, se trazaron dos cortes en dirección Este-Oeste y uno en dirección Norte-Sur (Fig. 33), que permiten observar de forma conjunta el corte transversal, los pozos, los marcadores, las diferentes curvas de perfiles de pozo seleccionados y las superficies correlacionadas.

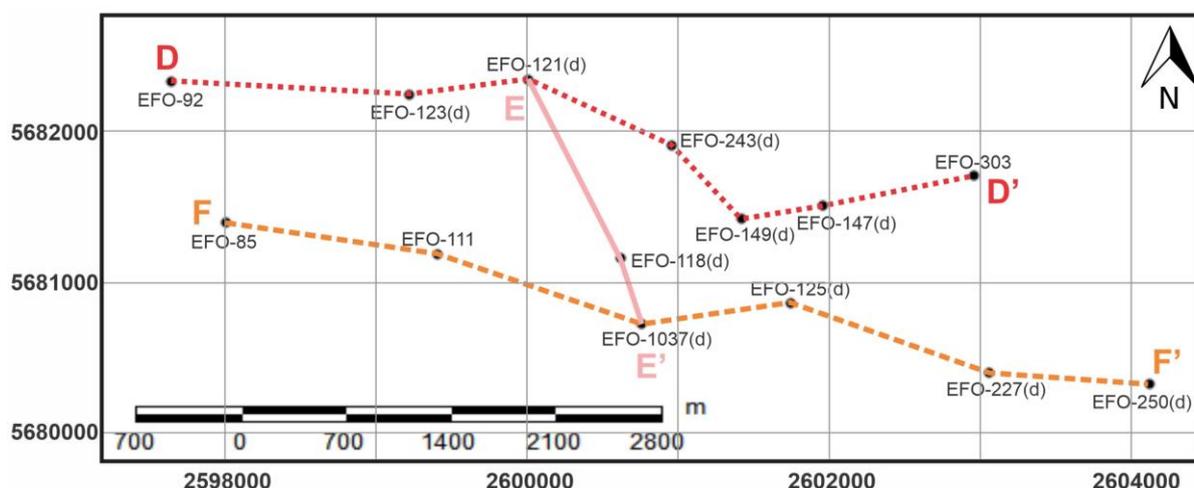


Figura 33. Paneles de correlación donde se observa la trayectoria de los tres cortes estratigráficos.

Con el objetivo de obtener una interpretación más completa de la estructura de la Formación Centenario, se realizaron tres cortes adicionales (Fig. 34), donde se incluyeron más pozos para mejorar la correlación y obtener una representación más fiel de la estructura en subsuelo. El primero de ellos (A-A') se orientó de Noroeste a Sureste (Fig. 35), mientras que los otros dos cortes (B-B' y C-B') se trazaron en dirección Noreste-Suroeste (Fig. 36 y 37).

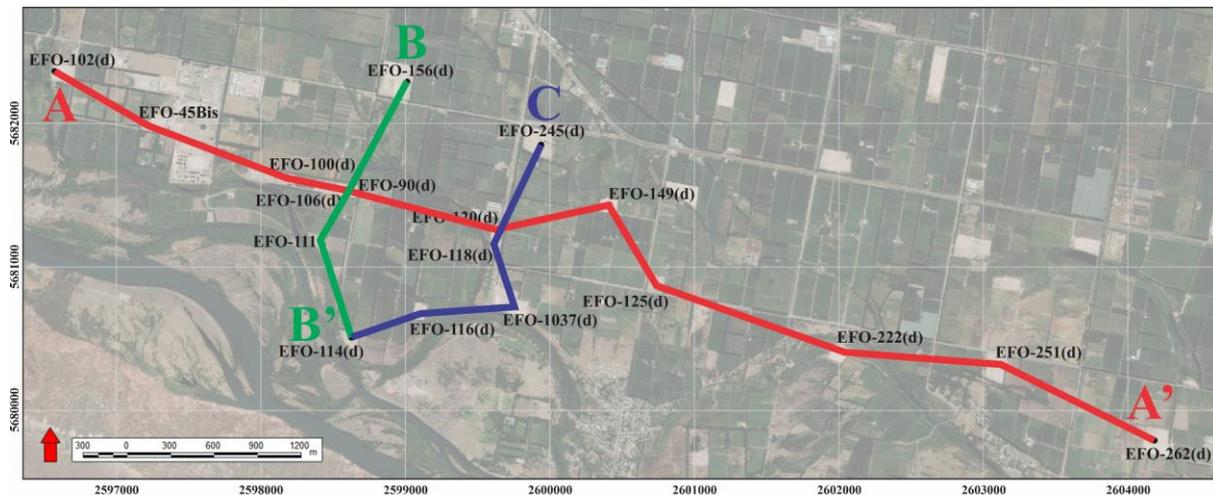


Figura 34. Cortes estructurales adicionales utilizados para correlación y generación de mapas.

En la Figura 35, en el corte estructural A-A' podemos observar un buzamiento suave hacia el Sureste de la formación hasta la posición del pozo EFO-251(d), mientras que el EFO-262(d) presenta una leve somerización en el extremo Sureste. La formación, a lo largo de la extensión del trazo, mantiene un espesor aproximado a los 750 m.

Por otra parte, los cortes B-B' y C-C' (Fig. 36 y 37), grafican el buzamiento en dirección Suroeste-Noreste, donde el pozo EFO-114(d) atraviesa un alto estructural, siendo este el nivel de menor profundización de la Formación Centenario. En estos cortes puede observarse que el espesor de la formación en dirección Suroeste-Noreste no es regular, sino que los marcadores de los topes, tanto del Miembro Centenario Superior como el Miembro Centenario Inferior, presentan mayor inclinación respecto a la base de la formación, la cual se presenta con mayor horizontalidad. Teniendo en cuenta la historia geológica de esta región, la inclinación diferencial de los horizontes que delimitan a la formación podría estar relacionada a movimientos tectónicos.

Para correlacionar los topes de ambos miembros se utilizaron niveles arcillosos, los cuales suelen cubrir grandes áreas geográficas, ya que se depositan en regímenes de baja energía, mientras que los cuerpos arenosos potentes frecuentemente presentan variaciones de espesor y carácter pozo a pozo.

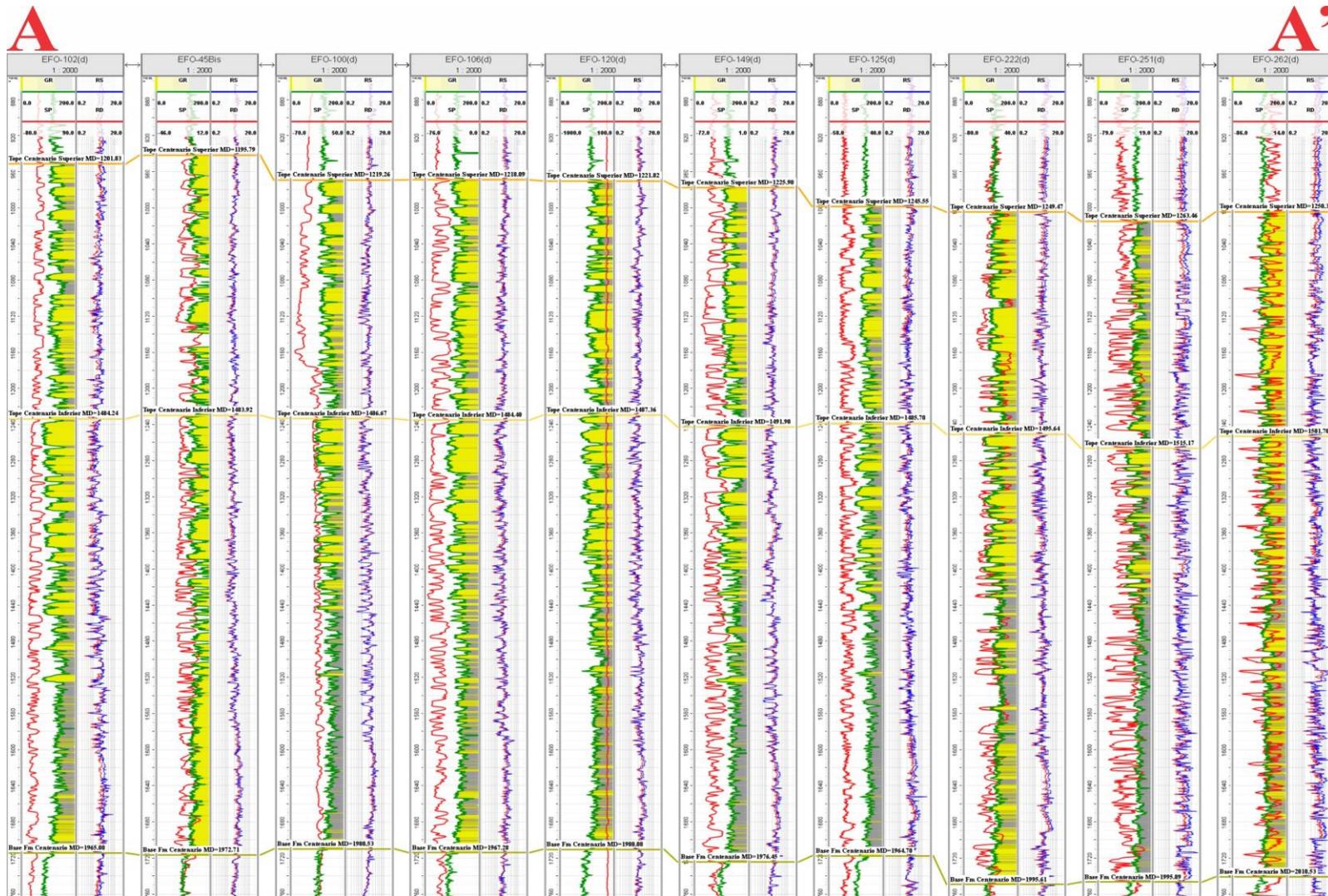


Figura 35. Corte Noroeste-Sureste de la Formación Centenario. El Miembro Centenario Superior presenta una intercalación de facies arenosas y arcillosas de forma regular en toda su extensión. El Miembro Centenario Inferior presenta una importante proporción de arcillitas con predominancia hacia la base, mientras que las arenas del nivel superior se presentan como arenas limpias, con buenas propiedades físicas.

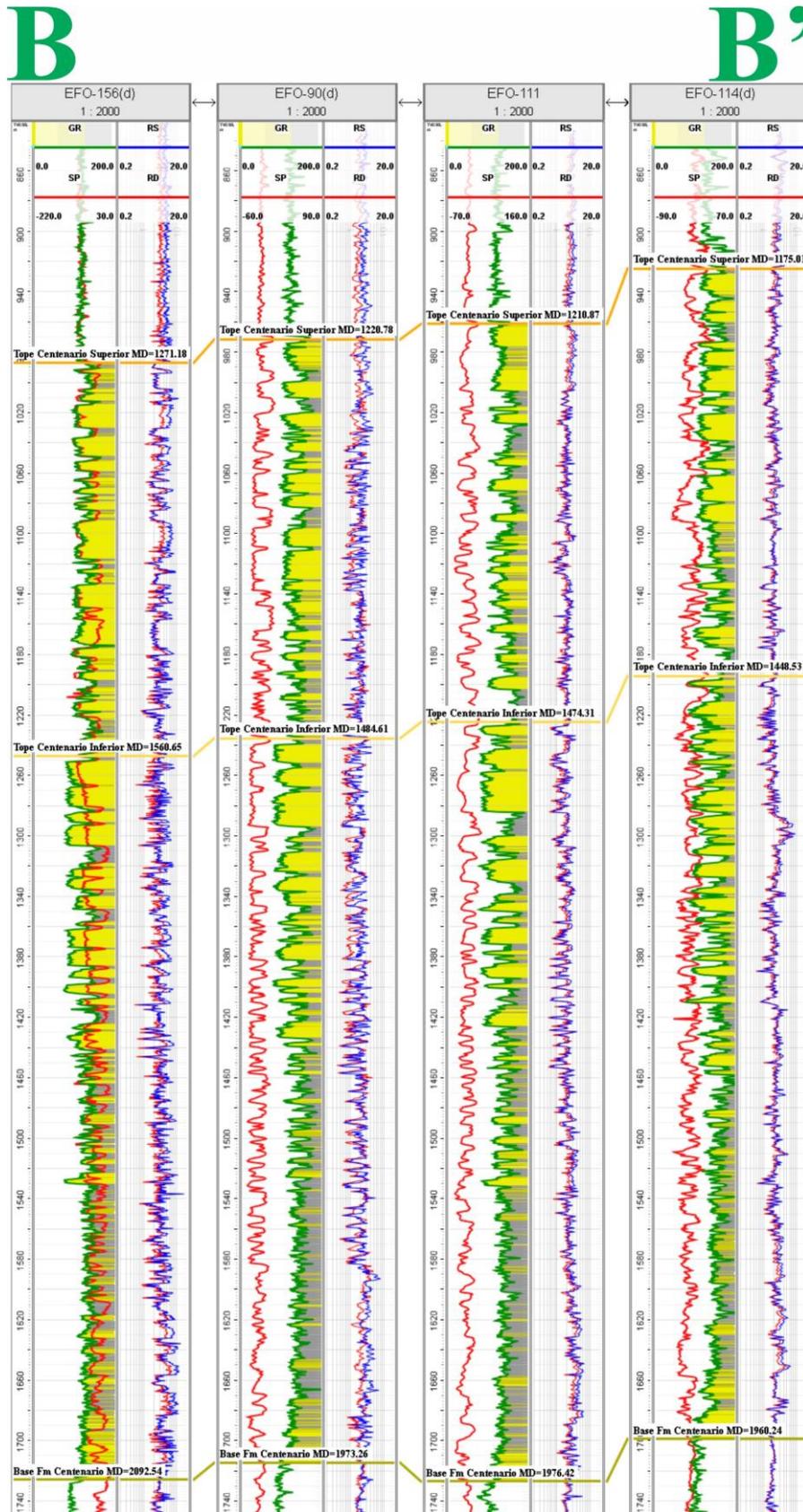


Figura 36. Corte Noreste-Suroeste de la Formación Centenario. Se observa una somerización de la estructura hacia el Suroeste con inclinación diferencial de los topes respecto a la base de la formación. Los espesores de los niveles arenosos se mantienen. La geometría de la estructura de la Formación Centenario parece haber sido afectada posteriormente a su depositación.

# C

# B'

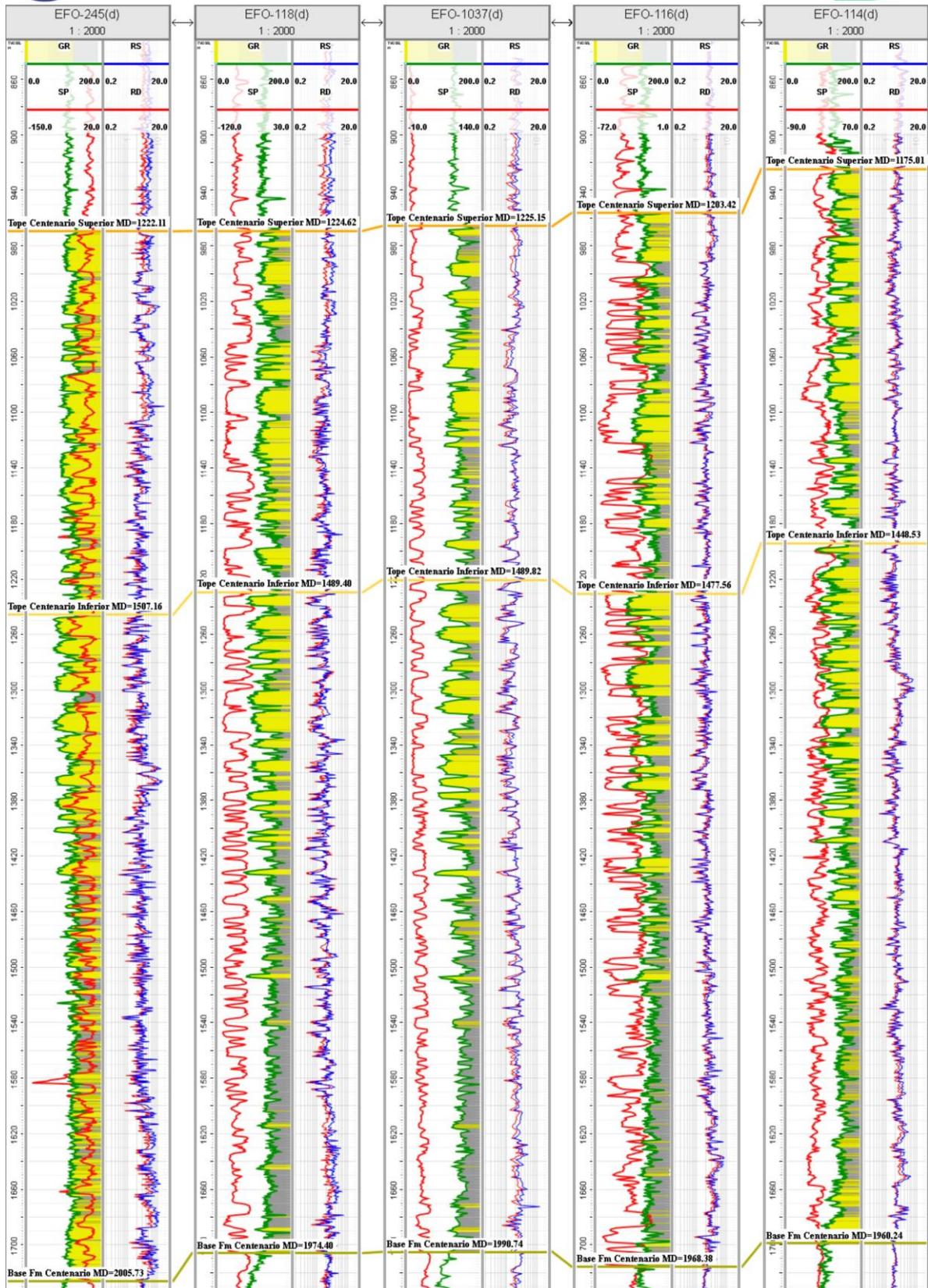


Figura 37. Corte Noreste-Suroeste de la Formación Centenario. De forma similar se observa una inclinación diferencial entre los topes de ambos miembros y la base de la formación.

## 6.6 Mapas

Un mapa es la representación gráfica y métrica de una población de datos sobre una superficie bidimensional (2D), generalmente plana. Dichos mapas están constituidos por elementos fundamentales como el Norte, escala, coordenadas geográficas, entre otros. Cualquier característica expresada en valores numéricos y ubicada en posiciones fijas sobre un mapa puede ser representada mediante curvas que unan valores iguales, denominadas curvas de isovalor. De esta manera, en mapas de subsuelo, se pueden representar características tales como, propiedades petrofísicas, espesores y cotas estructurales. A partir de los datos obtenidos se realizaron varios tipos de mapas a fin de representar gráficamente las diferentes características de la formación geológica objetivo, como son los mapas de tipo estructural, isopáquico y de isopropiedades.

Un mapa estructural representa la configuración geométrica en subsuelo de una superficie determinada, esencialmente de un límite de separación entre dos unidades litoestratigráficas, donde el dato de profundidad puede estar dado por la ubicación de marcadores definidos en cada pozo o a partir de reflectores sísmicos, donde estos últimos pueden utilizarse como tendencia para correlacionar aquellos pozos que no tienen registros de pozo disponibles.

Los mapas isopáquicos indican el espesor de cualquier formación, capa, nivel o estrato presente en el subsuelo. En estos mapas las curvas de isovalor se denominan isópacas y unen puntos de igual espesor. Por otra parte, en los mapas de isopropiedades las curvas unen puntos de igual valor de determinada propiedad física, espesor de arenas, porosidad, permeabilidad, entre otros.

## 7 RESULTADOS

La presente sección detalla los resultados obtenidos a partir de la caracterización estática de la Formación Centenario, ubicada en el yacimiento EFO. Esta formación, cuya edad abarca desde el Valanginiano al Hauteriviano, está compuesta principalmente por conglomerados, areniscas y arcilitas.

La caracterización se llevó a cabo utilizando datos petrofísicos obtenidos de registros de pozos y muestras de *cutting*, evaluando propiedades clave como la porosidad y la litología. Los resultados obtenidos permiten delinear las características principales de la formación, brindando información fundamental para los objetivos definidos en este estudio.

A continuación, se presentan los resultados de los diferentes análisis realizados, organizados en subsecciones que comprenden la correlación de pozos y delimitación de la Formación Centenario, análisis de muestras de cutting, las propiedades petrofísicas y mapas.

### 7.1 Horizontes y correlación

Los primeros horizontes en correlacionarse son la base del Grupo Neuquén y el nivel calcáreo más distintivo de la Formación Loma Montosa (Fig. 38), con la finalidad de utilizarlos como niveles guía desde un punto de vista amplio, debido a su distintiva respuesta en los registros de pozo y su extensión areal en subsuelo. Estos marcadores fueron definidos solamente a partir de los registros de pozo, ya que no se contó con muestras de *cutting* en la ubicación de ambos marcadores.

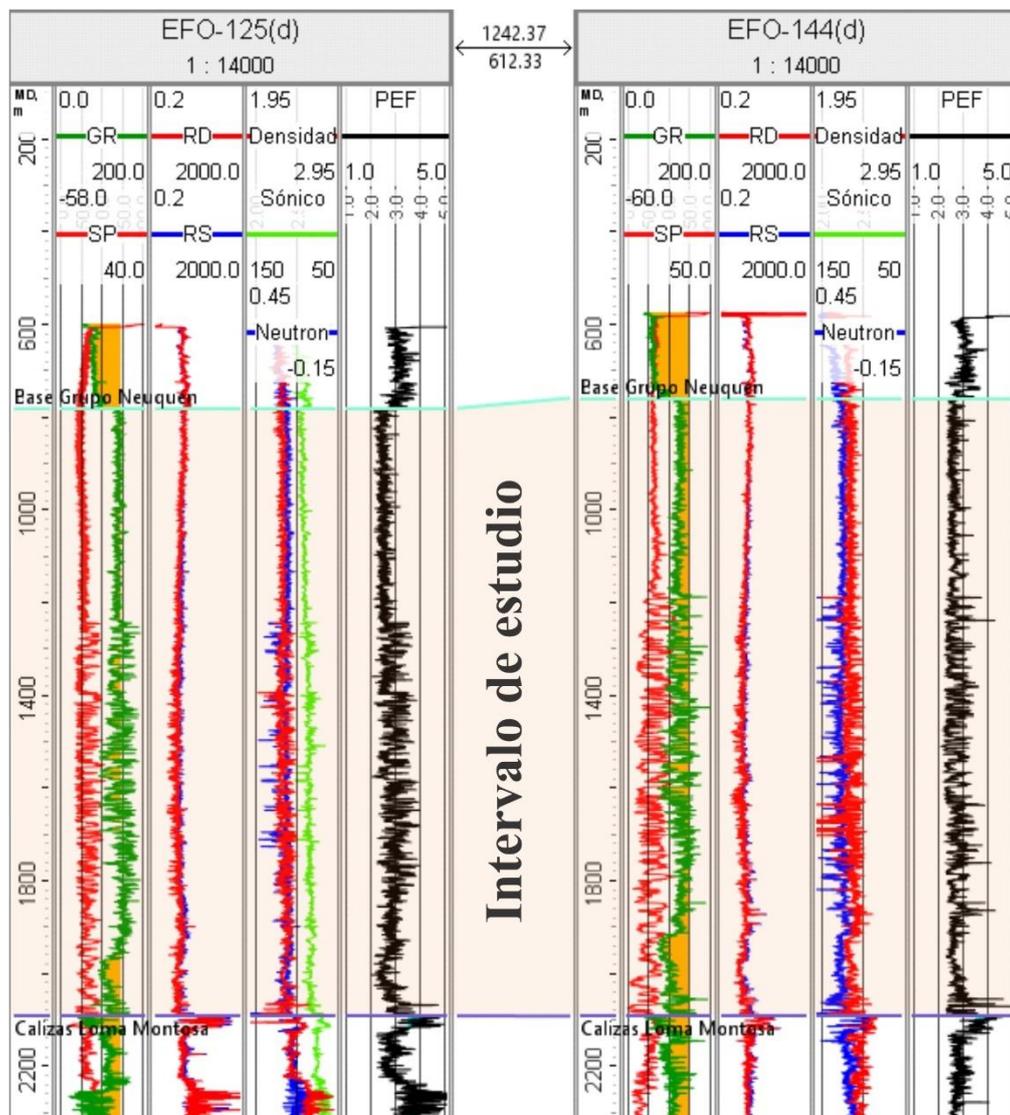


Figura 38. Ubicación de los horizontes correspondientes a la base del Grupo Neuquén y el nivel calcáreo de la Formación Loma Montosa, que determinan el espesor total del intervalo de estudio.

La base del Grupo Neuquén está caracterizada principalmente por una disminución en la lectura del GR, presentando un patrón cilíndrico aserrado desde la base hacia arriba. Por otra parte, el nivel calcáreo guía de la Formación Loma Montosa se define por presentar bajo GR, alta resistividad, PEF entre 3,5 y 5, 55  $\mu\text{s}/\text{pie}$  de la velocidad de onda y densidad de 2,7  $\text{gr}/\text{cm}^3$ .

De esta manera queda delimitado el intervalo de estudio donde la correlación continúa para los topes de los miembros Centenario Superior (Tope Formación Centenario), Miembro Centenario Inferior (discordancia Intrahauteriviana) y la base de la Formación Centenario.

### **7.1.1 Tope Miembro Centenario Superior**

El marcador se coloca a los 1.225 m de profundidad (MD) en el pozo EFO-1037(d) sobre un nivel arcilloso, el cual presenta buena continuidad lateral. Dicho nivel está representado por una respuesta característica para las arcillas, sin deflexión del SP, con valores altos de GR y cruzamiento densidad-neutrón (Fig. 39). El Miembro Centenario Superior presenta una intercalación de areniscas/conglomerados y arcilitas, mientras que la litología de las unidades por encima y por debajo del marcador no presentan características muy distintivas entre sí, por lo tanto, se ha dificultado colocar el marcador en base a la descripción de cutting. Respecto a los registros de pozo, se observa el límite entre las formaciones Rayoso y Centenario, a partir de un cambio en las respuestas de los registros de pozo. Sobre el tope, la Formación Rayoso está representada por un patrón aserrado regular en las curvas SP y GR, mientras que la Formación Centenario presenta una intercalación entre bancos arenosos con niveles arcillosos (Fig. 40).

### **7.1.2 Tope Miembro Centenario Inferior**

El marcador se coloca a los 1.489 m de profundidad (MD) en el pozo EFO-1037(d) sobre un nivel arcilloso de buena continuidad lateral. A continuación, se observan niveles de areniscas/conglomerados, los cuales presentan una lectura menor del GR, deflexión característica en el SP, disminución en la resistividad y separación de sus curvas, con valores entre 20 y 25 de porosidad neutrón y la curva de densidad acoplada a la de neutrón con valores de 2.30  $\text{gr}/\text{cm}^3$  aproximadamente (Fig. 41).

### **7.1.3 Base Miembro Centenario Inferior**

Las sedimentitas del Miembro Centenario Inferior presentan un aumento en la arcillosidad hacia la base. La base de la Formación Centenario se colocó a los 1.990 m de profundidad (MD) en el pozo EFO-1037(d) donde se observa una disminución en la radiactividad leída por el registro de GR, una deflexión del SP que no alcanza la línea base de

arenas limpias. El registro de resistividad muestra regularidad en las curvas, sin separación de las curvas. Respecto a los registros neutrón, densidad y sónico, presentan valores similares a los observados para la Formación Centenario (Fig. 42).

A partir de la correlación realizada en los pozos observados, se extendió la misma para aquellos pozos que están perfilados en el área de estudio, pero que no se presentan como una fuente de información completa, es decir, presentan registros de pozo incompletos o ausencia de control geológico. Esto permitió extender la posición de los marcadores a un área más representativa del yacimiento EFO, obteniendo 60 pozos correlacionados en EFO. Los marcadores permitieron generar los horizontes del tope, base y discordancia Intrahauteriviana (tope Miembro Centenario Inferior) de la Formación Centenario (Figs. 39, 40, 41 y 42), a fin de generar mapas estructurales e isopáquicos.

F

F'

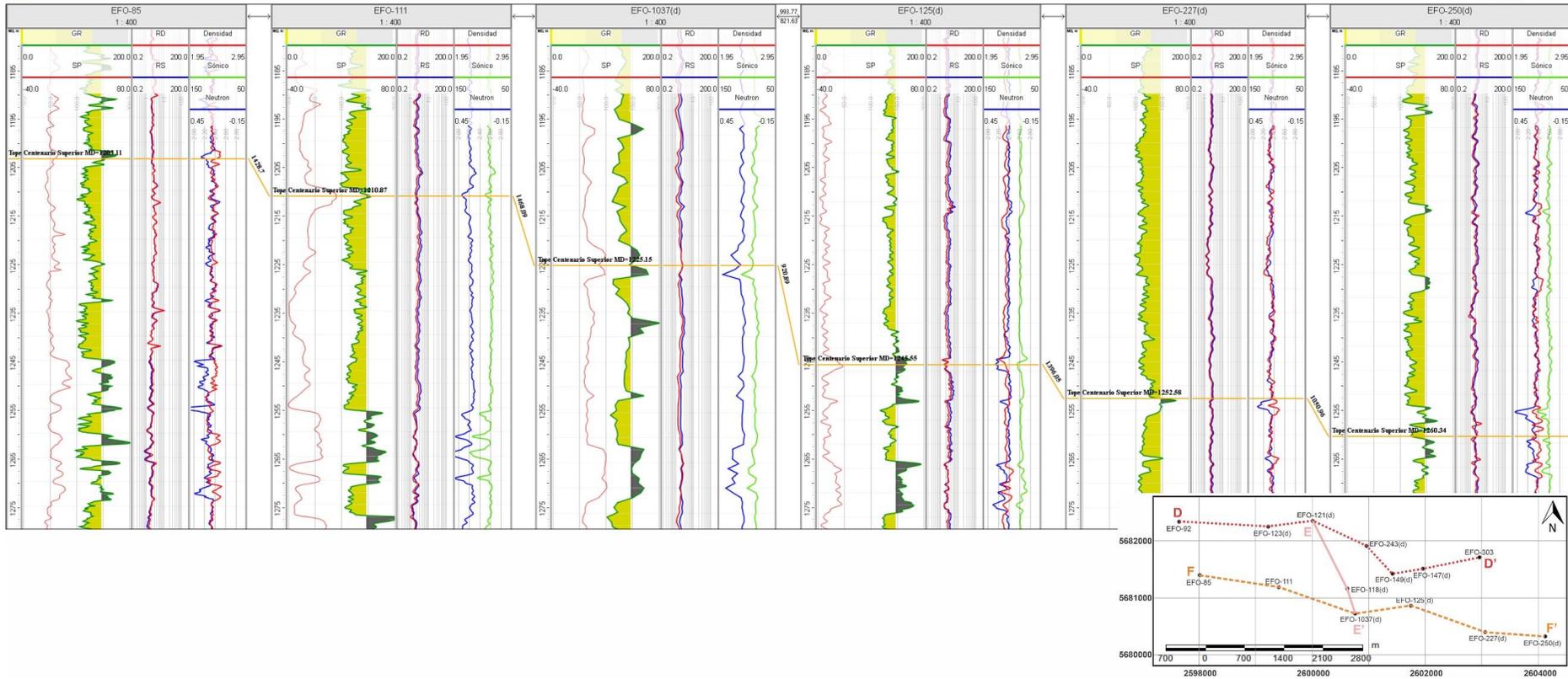


Figura 39. Sección de correlación del marcador correspondiente al topo de la Formación Centenario. El marcador permite diferenciar entre los patrones de las formaciones por encima y por debajo del mismo, con mayor intercalación de electrofacies de areniscas y arcillas en el Miembro Centenario Superior, y predominantemente arenoso hacia la Formación Rayoso (por encima del marcador).

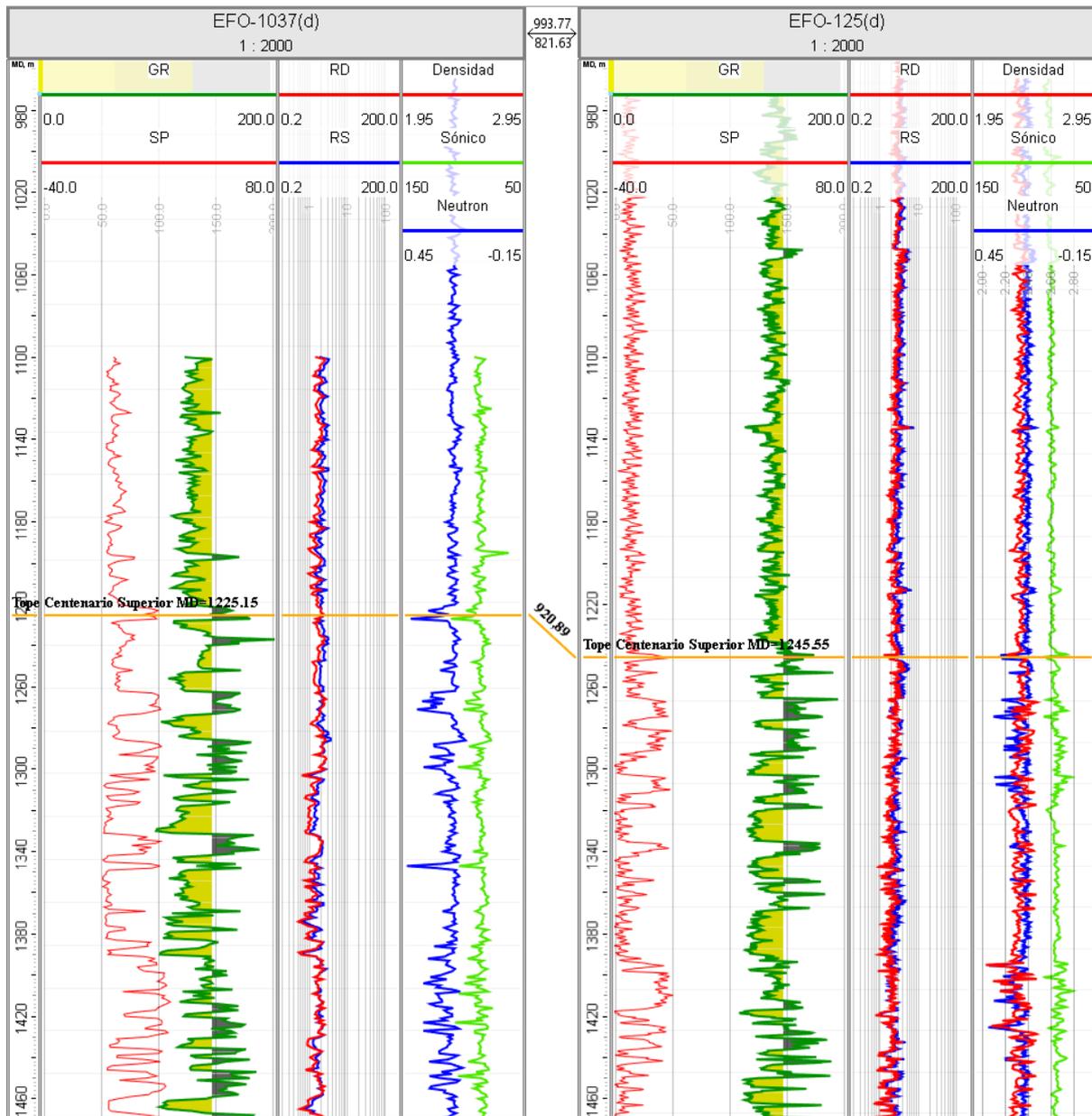


Figura 40. Correlación del tope de la Formación Centenario. En el pozo EFO-125(d) se aprecia el cambio en las electrofacies que permitieron definir el marcador.

F

F'

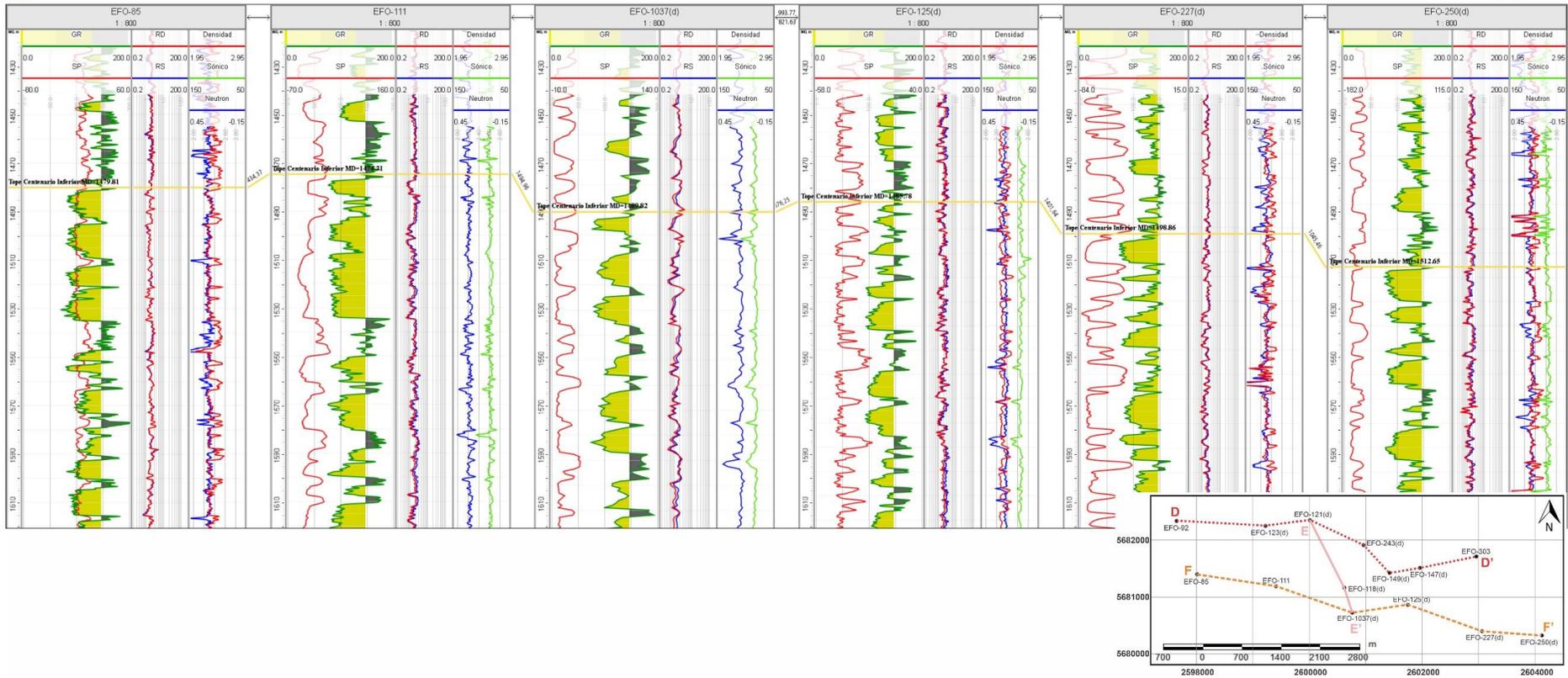


Figura 41. Sección de correlación con el marcador correspondiente al tope del Miembro Centenario Inferior. Sobre el marcador del tope se observa un importante nivel de arcillas que constituye, en forma conjunta, el sello en el Miembro Centenario Superior.

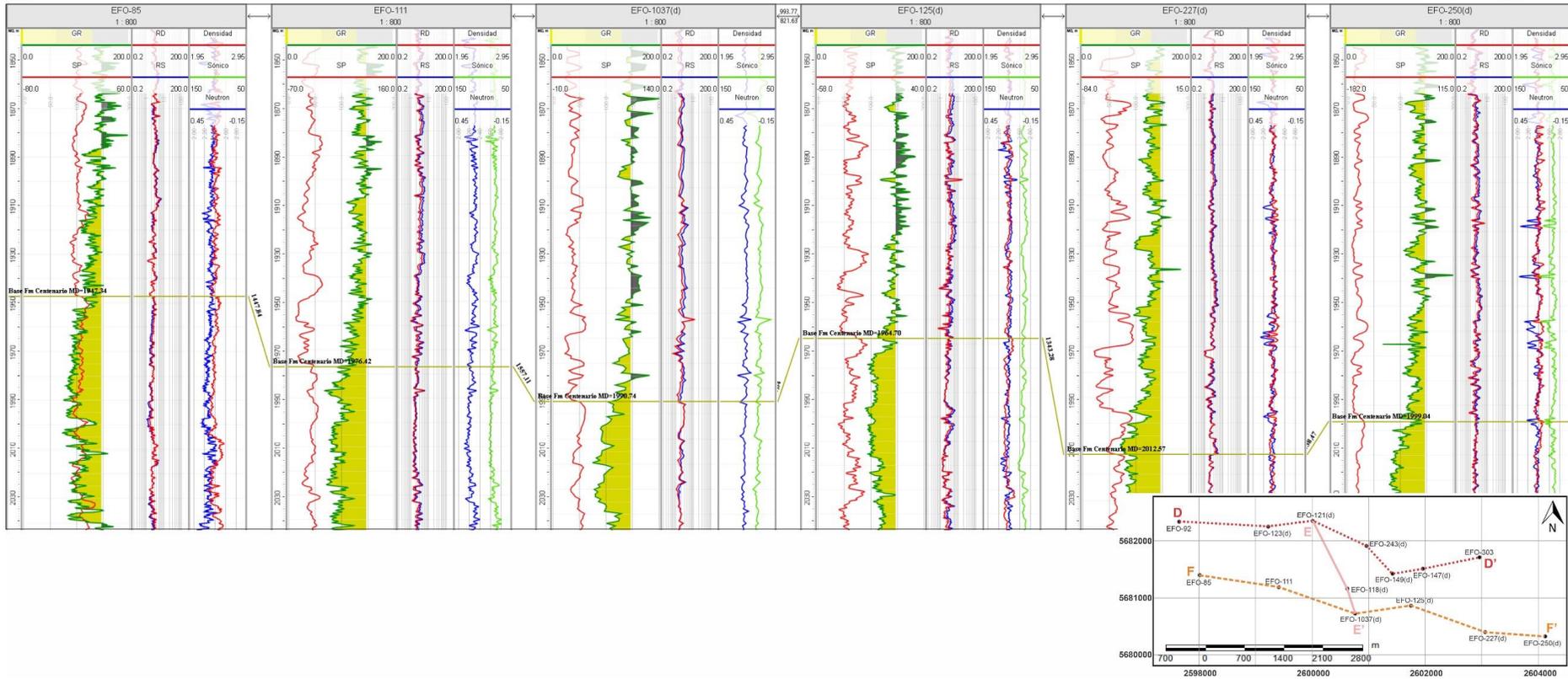
**F****F'**

Figura 42. Sección de correlación con el marcador correspondiente a la base de la Formación Centenario. El Miembro Centenario Inferior culmina con predominancia de arcillas hacia su sector inferior, cambiando a sedimentitas más gruesas por debajo del marcador.

## 7.2 Litología de los Miembros Centenario Superior y Centenario Inferior)

Tras la correlación de los horizontes, que incluyó la identificación del tope y la base de la Formación Centenario, así como el marcador entre sus miembros Superior e Inferior, se procedió al análisis de las litologías presentes en la formación. Esta sección se centra en la descripción de las características litológicas observadas a partir de muestras de cutting, con especial atención a la ubicación de los horizontes clave que delimitan la formación.

### 7.2.1 Miembro Centenario Superior

El Miembro Centenario Superior está constituido por areniscas y conglomerados que intercalan con niveles de arcilitas de diferentes espesores. Los conglomerados se clasifican como litofeldespáticos, debido a su importante proporción de líticos y feldespatos, además del cuarzo que lo compone. Las areniscas conglomerádicas descritas presentan cuarzo y abundantes feldespatos, mientras que los líticos se presentan con granulometría de gravas.

Para el Miembro Centenario Superior se describieron muestras en intervalos de arenas/conglomerados según datos de registros de pozo (Fig. 43) para las siguientes profundidades:

- a) 1220 m (Fig. 43A): **Arenisca 90%**, castaño rojizo, grano grueso a muy grueso, mala selección, clastos subangulosos a subredondeados. Cuarzosa, líticos verdosos – castaños – grises y clastos partidos, escasa matriz arcillosa. La muestra no presenta reacción al HCl. Rastros secos de HC.

**Arcilita 10%**, castaño rojizo, masiva con inclusiones arenosas, friable.

- b) 1235 m (Fig. 43B): **Arenisca 85%**, castaño rojizo, grano mediano a grueso, menor muy grueso, mala selección, clastos subangulosos a subredondeados. Cuarzosa, líticos verdosos – anaranjados – amarillentos y clastos partidos, escasa matriz arcillosa. Sin reacción al HCl. Rastros secos de HC.

**Arcilita 15%**, castaño rojizo, masiva con inclusiones arenosas, friable.

- c) 1245 m (Fig. 43C): **Arenisca 100%**, castaño rojizo, grano fino a muy grueso, mala selección, clastos subangulosos a subredondeados. Cuarzosa, líticos gris verdosos – anaranjados – amarillentos – castaños, mientras que se observa escasa matriz arcilloso. Sin reacción al HCl.

- d) 1260 m (Fig. 43D): **Arenisca conglomerádica 90%**, castaño rojizo, grano mediano a conglomerádico, polimíctico, mala selección, clastos subangulosos a subredondeados. Cuarzosa, feldespatos, clastos partidos, líticos ígneos verdosos – gris verdosos, líticos

anaranjados – amarillentos, con escasa matriz arcillosa – arenosa, escasa matriz arcillosa.

**Arcilita 10%**, castaño rojizo, masiva, friable.

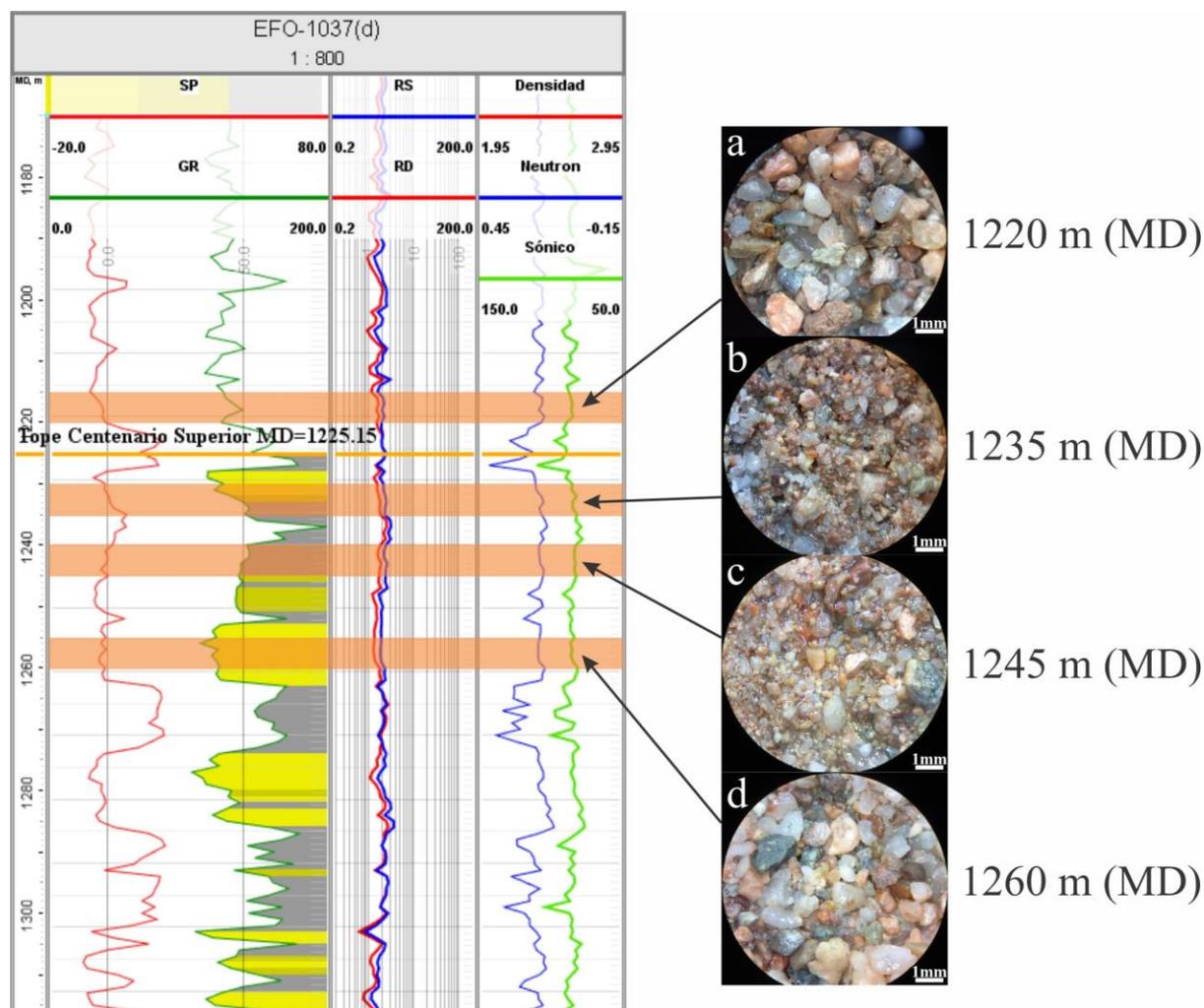


Figura 43. Muestras de cutting analizadas y su ubicación en profundidad para el tope del Miembro Centenario Superior.

### 7.2.2 Miembro Centenario Inferior (tope)

El Miembro Centenario Inferior se compone por intercalaciones de cuerpos arenosos y conglomerádicos con niveles pelíticos de distintos espesores. Las areniscas conglomerádicas están constituidas por una mayor proporción de cuarzo que de feldspatos y líticos. Dicha composición se corresponde con los valores de GR menores a los leídos para el Miembro Centenario Superior.

Las muestras descritas se corresponden a los principales niveles arenosos ubicados hacia el tope del Miembro Centenario Superior (Fig. 44), las cuales se describen a continuación:

- a) 1495 m (Fig. 44A): **Arenisca conglomerádica 90%**, castaño claro, grano fino a grueso, mala selección, clastos subangulosos a subredondeados. Cuarzosa, líticos verdosos – amarillentos y clastos partidos, escasa matriz arcillosa. Sin reacción al HCl.  
**Arcilita 10%**, castaño rojizo, masiva con inclusiones arenosas, friable.
- b) 1505 m (Fig. 44B): **Arenisca 40%**, castaño claro, grano fino a grueso, mala selección, clastos subangulosos a subredondeados. Cuarzosa, líticos verdosos – anaranjados – amarillentos y clastos partidos, se observa poca matriz arcillosa.  
**Arcilita 60%**, castaño rojizo, masiva con inclusiones arenosas y menor planar, friable.
- c) 1515 m (Fig. 44C): **Arenisca 90%**, castaño claro, grano fino a mediano, mala selección, con clastos subangulosos a subredondeados. Se observan cristales de cuarzo, líticos verdosos – anaranjados – amarillentos, con escasa matriz arcillosa.  
**Arcilita 10%**, castaño rojizo, planar y masivo, friable.
- d) 1530 m (Fig. 44D): **Arenisca 90%**, castaño claro, grano mediano a grueso, mala selección, con clastos subangulosos a subredondeados. Se observan mayormente cuarzo subhedral – euhedral, líticos verdosos – anaranjados – amarillentos, y se observa escasa matriz arcillosa.  
**Arcilita 10%**, castaño rojizo, masivo, friable.

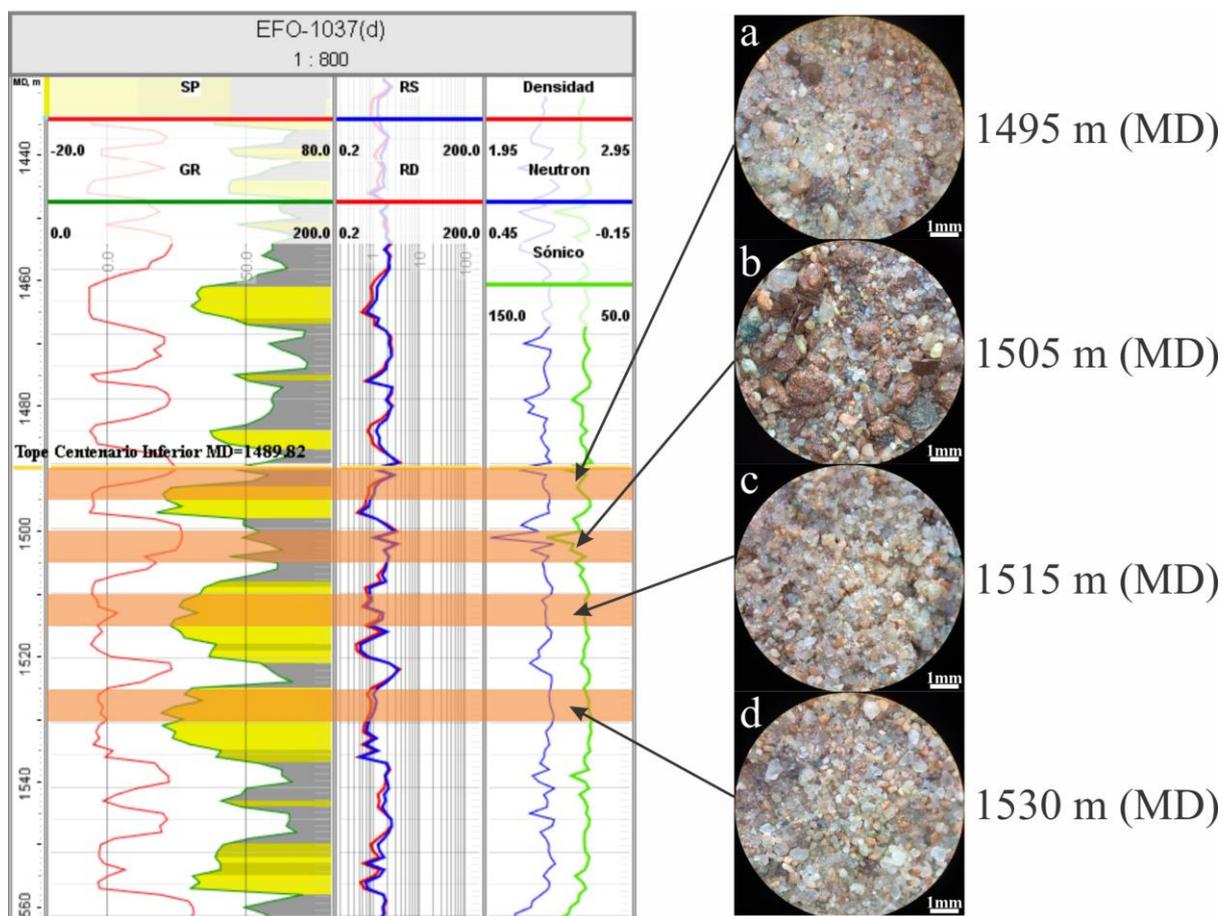


Figura 44. Muestras de cutting analizadas y su ubicación en profundidad en el tope del Miembro Centenario Inferior.

### 7.2.3 Miembro Centenario Inferior (base)

Hacia la base del Miembro Centenario Inferior presenta una mayor proporción de arcilitas intercalando con niveles arenosos de poco espesor (Fig. 45). Se observaron muestras de cutting para observar sus características, las cuales se describen a continuación:

- a) 1960 m (Fig. 45A): **Arenisca 85%**, castaño rojizo, grano mediano a grueso, mala selección. Cuarzosa, líticos verdosos – anaranjados – blanquecinos, angulosos a subangulosos, clastos partidos, mala selección, escasa matriz arcillosa. Rastros secos HC.

**Arcilita 15%**, castaño rojizo, masiva, friable.

- b) 1970 m (Fig. 45B): **Arenisca 70%**, castaño rojizo, grano mediano a grueso, menor muy grueso, mala selección. Cuarzosa, líticos verdosos – anaranjados, menor amarillentos, clastos subangulosos a angulosos y clastos partidos, escasa matriz arcillosa. Rastros secos HC.

**Arcilita 30%**, castaño rojizo, masiva, menor con inclusiones arenosas, friable.

c) 1990 m (Fig. 45C): **Arenisca 90%**, color castaño, grano fino a mediano, menor grueso, moderada selección. Cuarzosa, líticos verdosos – anaranjados y clastos partidos, clastos subangulosos a angulosos, escasa matriz arcillosa. Rastros secos HC.

**Arcilita 10%**, castaño rojizo, masiva, friable.

d) 1995 m (Fig. 45D): **Arenisca conglomerádica 80%**, castaño rojizo, grano fino a grueso, menor muy grueso/conglomerádico, muy mala selección. Cuarzosa, líticos verdosos y amarillentos, clastos subredondeados a subangulosos, mala selección, clastos partidos, escasa matriz arcillosa. Rastros secos HC.

**Arcilita 20%**, castaño rojizo, masiva, friable.

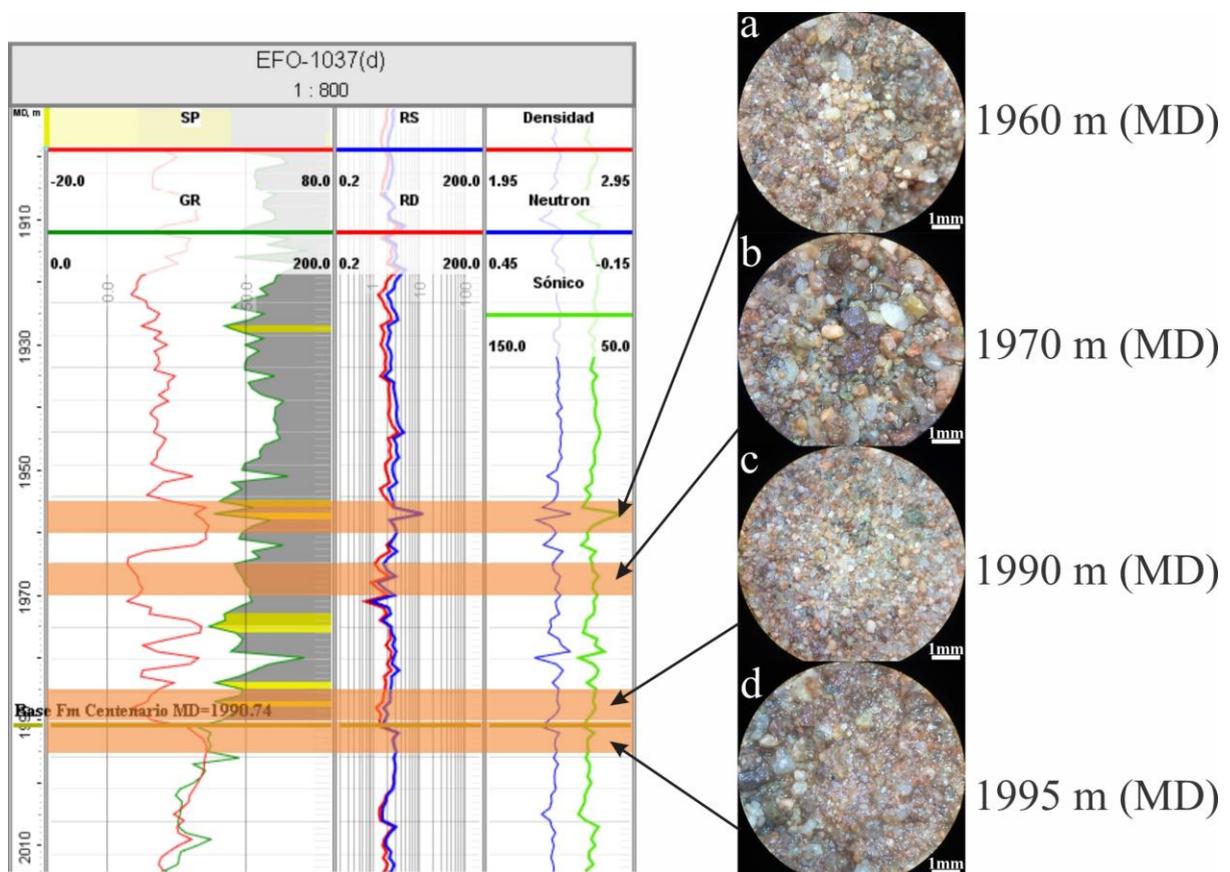


Figura 45. Muestras de cutting analizadas y su ubicación en profundidad para la base de la Formación Centenario.

### 7.3 Propiedades petrofísicas

#### 7.3.1 Porosidad

En esta sección, se presentan las porosidades total y efectiva calculadas (ecuaciones 3 y 4) para los miembros Centenario Superior (Fig. 46) y Centenario Inferior (Fig. 47). Dicha información es importante para definir cuáles son los intervalos con valores de porosidad óptimos para definirlos como reservorios.

### **7.3.2 Porosidad total y efectiva (Miembro Centenario Superior)**

Los registros de pozo para el Miembro Centenario Superior nos permiten observar una intercalación de niveles arenosos y arcillosos, los cuales presentan valores de volumen de arcilla menores y mayores, respectivamente (Fig. 46).

Las sedimentitas del Miembro Centenario Superior en el pozo EFO-1037(d) presenta una porosidad total promedio de 22%, mientras que el pozo EFO-125(d) tiene una porosidad total promedio de 19%. Se muestran ambos pozos porque los patrones de las curvas suelen presentar variaciones, lo que lleva, particularmente a partir del sónico, a variaciones en los resultados de la porosidad, sin ser cambios drásticos, ya que su respuesta se corresponde de igual manera con las litologías observadas. En el pozo EFO-125(d) el resultado respecto a las porosidades es más claro, donde se distinguen con mayor facilidad los niveles arenosos de los arcillosos. Los valores de porosidad efectiva se corresponden con la litología presente, con valores mayores en los niveles arenosos, donde se acerca al valor de porosidad total. El promedio aritmético de la porosidad efectiva se calculó en areniscas discriminando los valores menores a 5% de porosidad efectiva, las cuales pertenecen prácticamente a todas las arcillas.

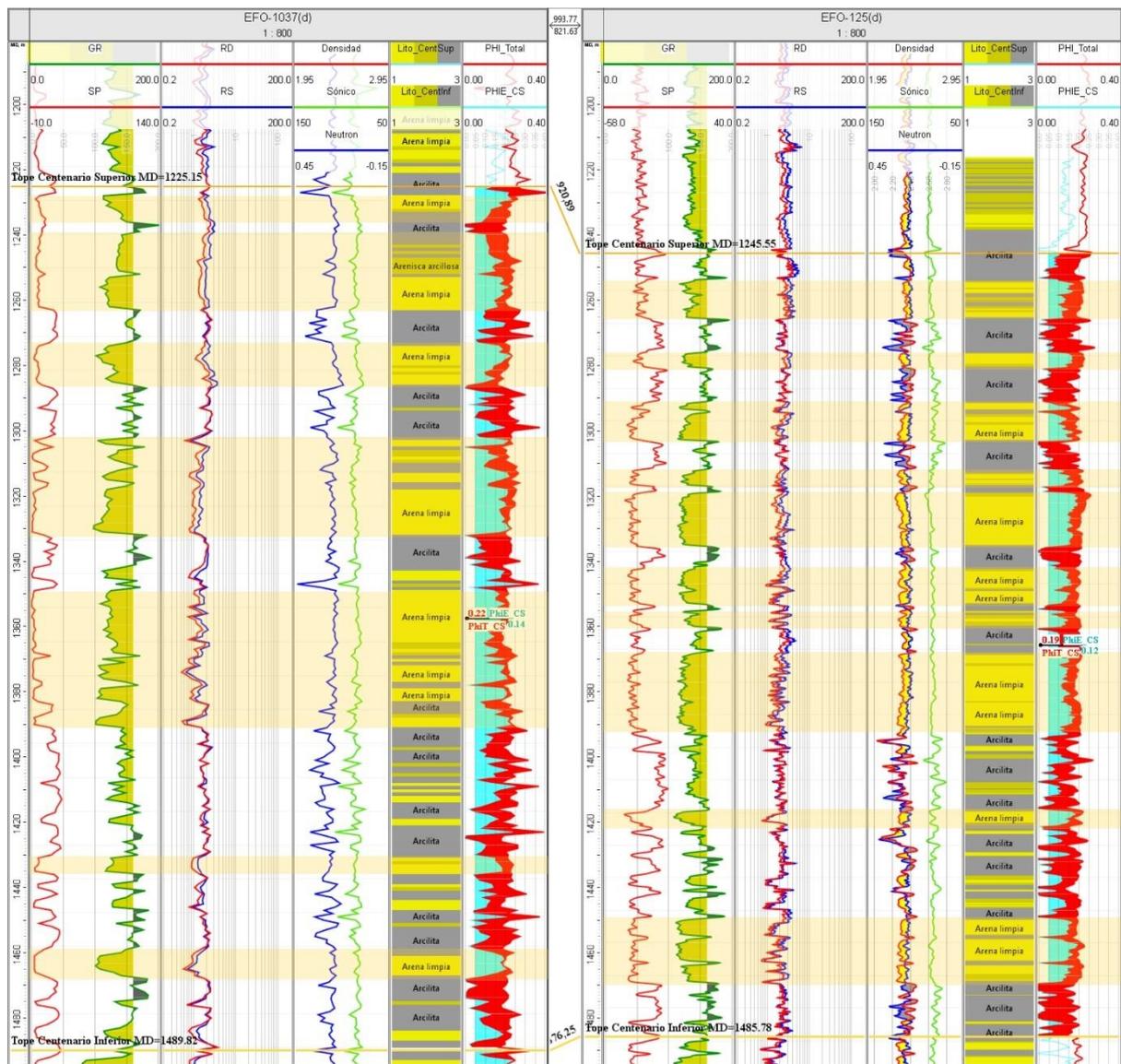


Figura 46. Curvas de porosidad total y efectiva en el Miembro Centenario Superior. A la izquierda el pozo EFO-1037(d) y a la derecha el pozo EFO-125(d), respectivamente. En amarillo se resaltan las areniscas y su correspondencia con los valores calculados de porosidad más elevados.

Los valores de porosidad efectiva suelen ser mayores al 10% e incluso llegando a superar el 15% en ciertos niveles. Esto último está mejor representado en el pozo EFO-1037(d), mientras en el pozo EFO-125(d) son más comunes los valores entre 10% y 15%, con valores de porosidad total cercanos al 20%.

Para el Miembro Centenario Superior en los pozos EFO-1037(d) y EFO-125(d) se obtuvo una porosidad efectiva promedio de 14% y 12%, respectivamente. Cabe destacar que en el Miembro Centenario Superior los niveles arenosos están distribuidos a lo largo de toda la unidad, tanto en el tope, como en el centro y hacia la base.

### 7.3.3 Porosidad total y efectiva (Miembro Centenario Inferior)

El Miembro Centenario Inferior presenta una importante diferencia en la proporción de arenas y arcilitas en la secuencia sedimentaria (Fig. 47). En el pozo EFO-1037(d) se obtuvieron valores de porosidad total promedio de 19% y de porosidad efectiva promedio de 13%, mientras que en el pozo EFO-125(d) el valor de porosidad total promedio es de 18% y de porosidad efectiva promedio es de 10%. En el caso del Miembro Centenario Inferior, los valores de porosidad efectiva se ven afectados por los niveles inferiores, donde hay mayor concentración de areniscas arcillosas y arcilitas, bajando el valor promedio, sin embargo, es en esta unidad donde los valores de porosidad efectiva se acercan más a los valores de porosidad total.

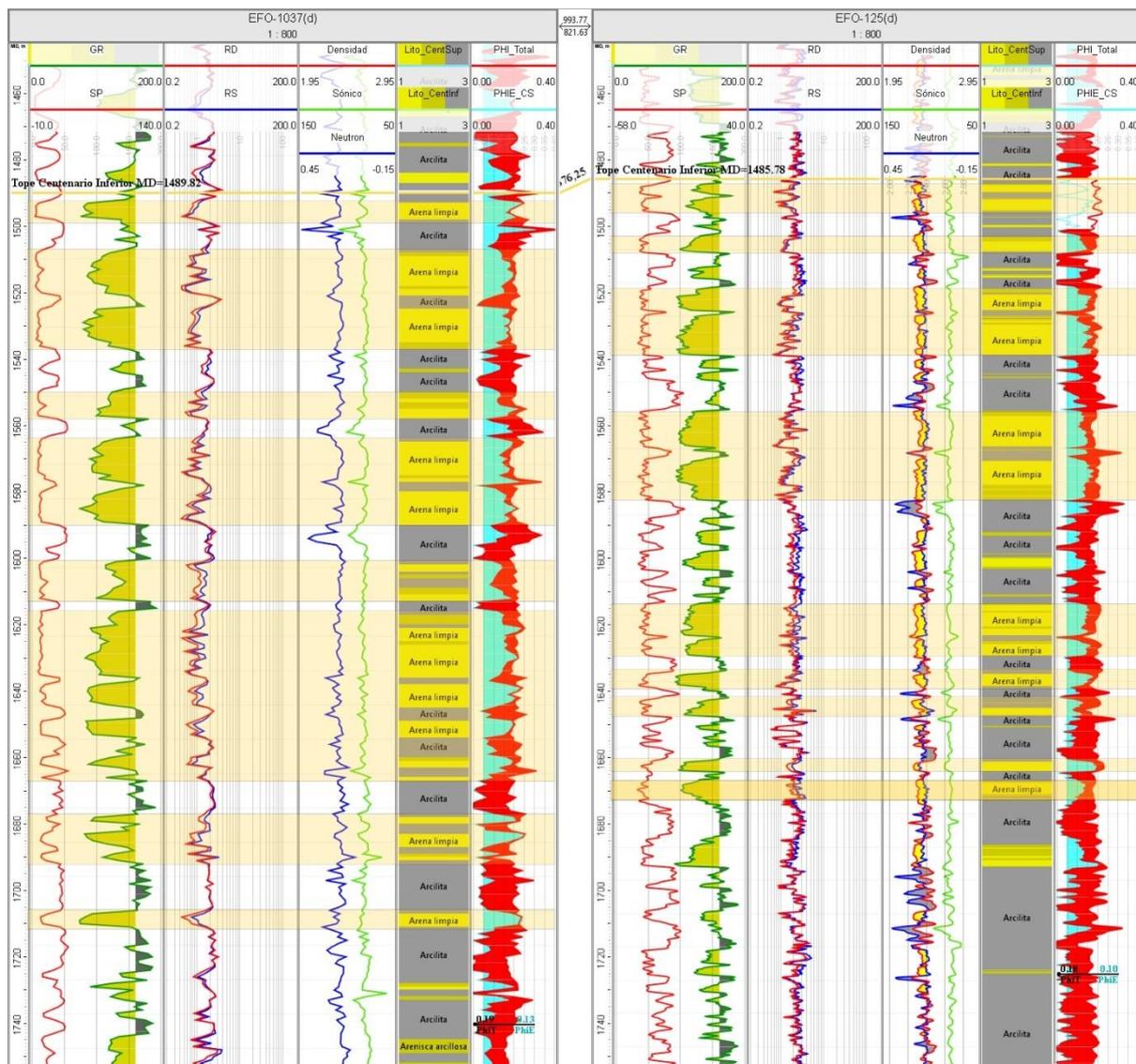


Figura 47. Valores de porosidades total y efectiva en el Miembro Centenario Inferior. A la izquierda el pozo EFO-1037(d) y a la derecha el pozo EFO-125(d), respectivamente. En amarillo se resaltan las areniscas y su correspondencia con los valores calculados de porosidad más altos.

El Miembro Centenario Inferior se considera más apto como reservorio para el agua de retorno en comparación con el Miembro Centenario Superior. Esto se debe a que, sobre el tope del Miembro Centenario Inferior, se encuentra un nivel arcilloso de buena extensión lateral que puede actuar como un potencial sello, respaldado por la sumatoria de las arcillas presentes en el Miembro Centenario Superior. Por otra parte, el Miembro Centenario Superior no cuenta con un sello hidráulico definido en su parte superior, ya que se encuentra en continuidad directa con las sedimentitas de la Formación Rayoso.

## **7.4 Mapas**

### **7.4.1 Mapas estructurales**

Se generaron tres mapas estructurales correspondientes a los principales marcadores de la Formación Centenario: el tope del Miembro Superior, el tope del Miembro Centenario Inferior y la base del Miembro Centenario Inferior. Los mismos representan la disposición espacial y las variaciones estructurales de la formación, proporcionando una representación clara de las elevaciones y depresiones presentes en cada horizonte.

#### *7.4.1.1 Tope Miembro Centenario Superior*

En el tope del Miembro Centenario Superior (Fig. 48), se observa un alto estructural cercano a los pozos EFO-1037(d), EFO-111 y EFO-85, a partir del cual se identifican dos buzamientos principales. Desde el Oeste suroeste se observa un buzamiento principal, o el más marcado, hacia el Este sureste, con un cierre estructural mayor a 60 m. La distancia Oeste-Este es mayor a 7 km, por ende, la pendiente es suave, con un ángulo aproximado de 1°. Por otra parte, la superficie presenta un buzamiento menos marcado hacia el Noreste, con un cierre estructural cercano a los 40 m. El buzamiento de dirección Este-Oeste puede apreciarse también en las Fig. 35 y 39, y puede observarse la particularidad de que ambos topes, tanto del Miembro Centenario Superior, como del Miembro Centenario Inferior, tienen una mayor inclinación en dirección Norte-Sur, con mayor somerización hacia el sur (Fig. 36 y 37), correspondiente al alto estructural observado en el mapa. Posiblemente, esta deformación diferencial puede estar relacionada a la influencia tectónica de la Falla de Río Negro.

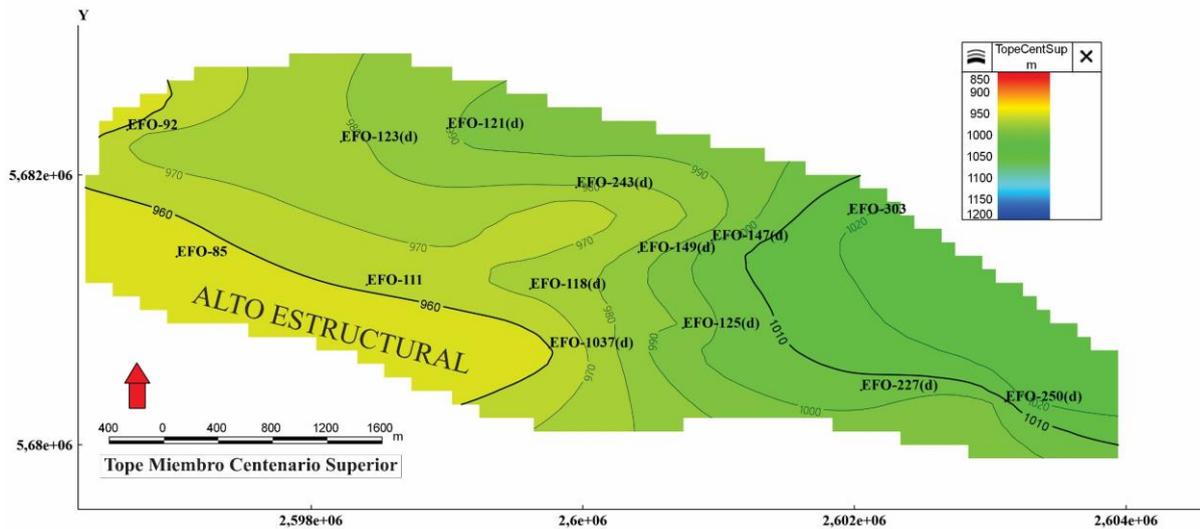


Figura 48. Mapa estructural del tope del Miembro Centenario Superior. Al Suroeste se señala la ubicación del alto estructural o zona de menor profundización.

#### 7.4.1.2 Tope Miembro Centenario Inferior

Se observa una inclinación principal hacia el Este-Noreste con variaciones en la profundidad que rondan los 50 m hacia el margen oriental (Fig. 49). Al oeste, la estructura presenta una elevación más pronunciada en el sector central en comparación al Miembro Centenario Superior, lo que se evidencia con líneas de contorno más cercanas entre sí. Las elevaciones más significativas se observan en los pozos EFO-111, EFO-118(d) y EFO-1037(d), donde el tope se encuentra a aproximadamente 1.230 m, mientras que la mayor profundización se da hacia el este, en cercanías a los pozos EFO-303 y EFO-250(d), alcanzando profundidades cercanas a los 1.270 m. Principalmente hacia el Sur, vemos que hay una profundización en la superficie, evidenciando una estructura que se interpreta como un anticlinal con una apertura suave.

Al igual que sucede con el tope del Miembro Centenario Superior, se observa una segunda orientación de inclinación de la estructura hacia el Noreste, con una profundización que no supera los 30 m.

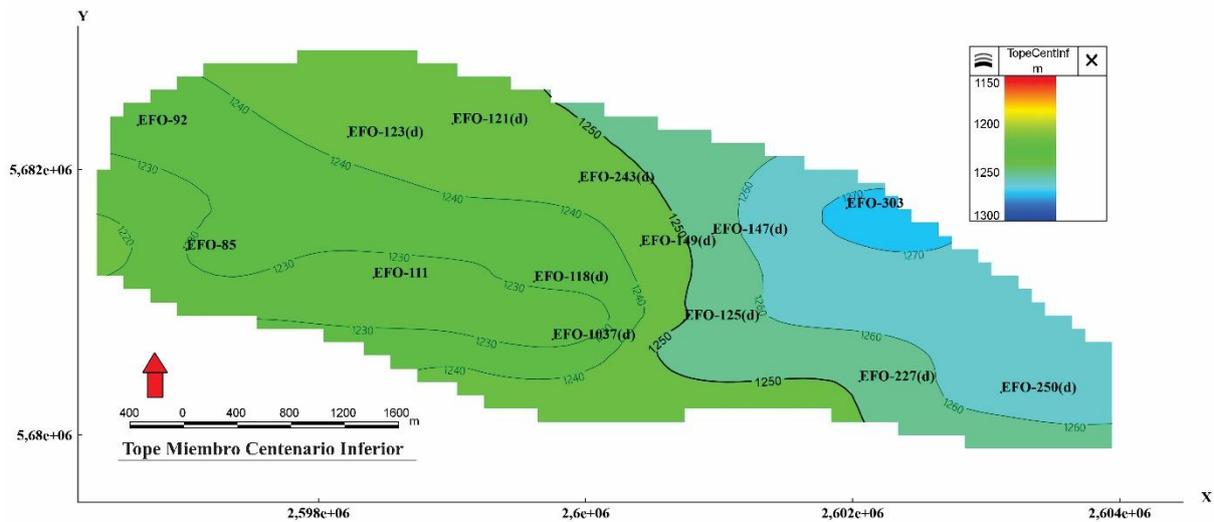


Figura 49. Mapa estructural del tope del Miembro Centenario Inferior. La estructura profundiza hacia el Este, con un cierre estructural aproximado a los 60 m.

### 7.4.1.3 Base Miembro Centenario Inferior

El mapa estructural de la base del Miembro Centenario Inferior muestra una inclinación predominante hacia el Este-Noreste, con variaciones significativas en la profundidad. El rango de profundidades varía entre los 1.690 y 1.770 m (Fig. 50).

En la parte central se destaca una estructura de domo, principalmente alrededor del pozo EFO-1037(d), donde la base del Miembro Centenario Inferior alcanza una profundidad cercana a los 1.710 m. Esta elevación se extiende hacia el pozo EFO-118, que extendido hacia el oeste en la zona del pozo EFO-85, se genera un alto estructural en la misma ubicación que los horizontes superiores. Hacia el este del pozo EFO-1037(d) la inclinación de la estructura es suave y relativamente constante, con líneas de contorno más separadas que denotan una pendiente más suave llegando a una profundidad cercana a los 1.760 m entre los pozos EFO-227(d), EFO-250(d) y EFO-303. También se observa hacia el norte una suave inclinación, pero con cotas que no superan los 30 m entre mayor y menor profundidad.

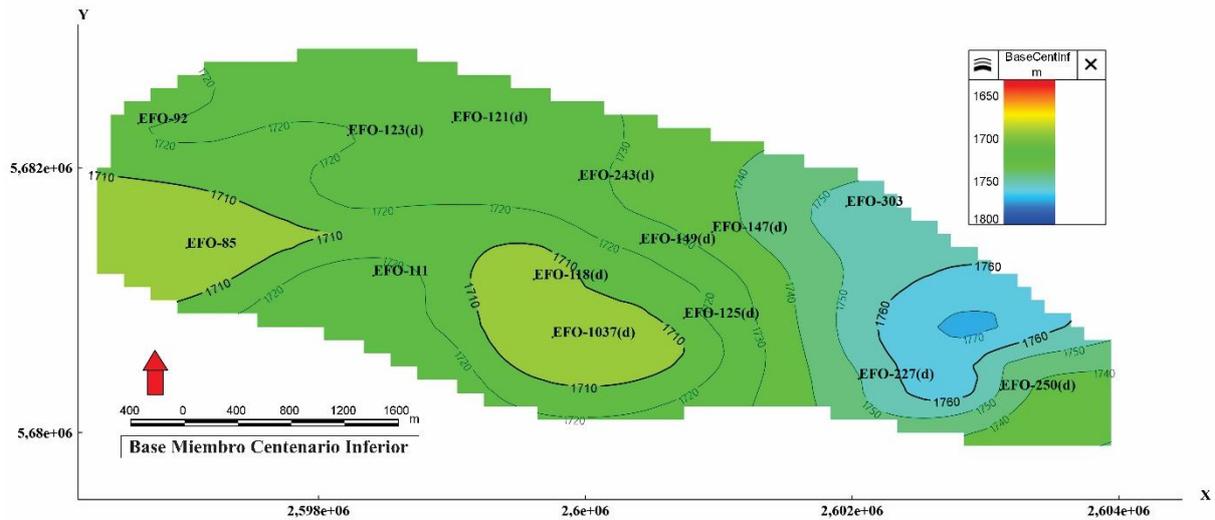


Figura 50. Mapa estructural de la base del Miembro Centenario Inferior. La estructura presenta una mayor complejidad, profundiza hacia el Este, con las zonas más elevadas en el sector central Sur y hacia el Oeste. Las cotas entre mayor y menor profundidad son de 50 m aproximadamente.

#### 7.4.2 Mapas isopáquicos

Se realizaron mapas isopáquicos de los miembros que constituyen la Formación Centenario. Los resultados muestran variaciones en el espesor de cada miembro a lo largo del área de estudio.

El Miembro Centenario Superior (Fig. 51) muestra una disminución en el espesor hacia el Este, con valores cercanos a los 250 m de potencia, respecto a los 270 m de espesor en el sector central entre los pozos EFO-243(d), EFO-149(d) y EFO-147(d). El cambio en general es suave, aumentando hacia el suroeste, donde se leen valores que, incluso, superan los 280 m.

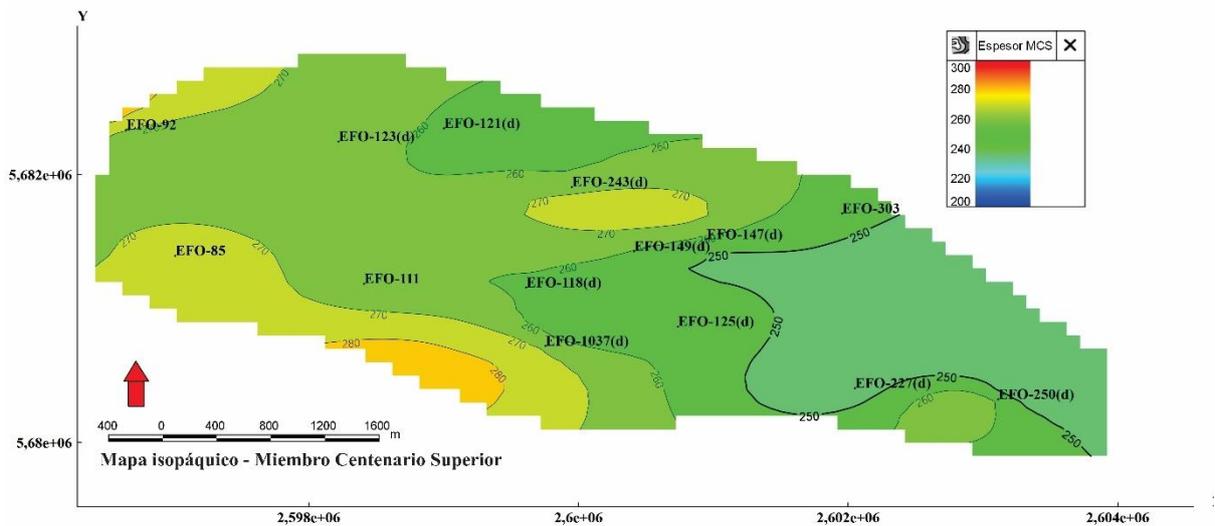


Figura 51. Mapa isopáquico del Miembro Centenario Superior. El espesor de la formación es regular, la diferencia de potencia no supera 50 m.

El Miembro Centenario Inferior (Fig. 52) muestra valores de espesor relativamente constantes en la parte Norte del área de estudio. Sin embargo, en la parte sur, se observan variaciones en el espesor, no muy bruscas, pero con diferencias máximas entre los espesores mayores y menores de aproximadamente 30 m a 35 m. Las zonas de menor espesor se localizan al Oeste, en el pozo EFO-85, y en el área central Sur, cerca de los pozos EFO-1037(d) y EFO-125(d). En contraste, los mayores espesores se encuentran cerca del pozo EFO-111 y hacia el Este, en los alrededores de los pozos EFO-227(d), alcanzando valores superiores a los 500 m.

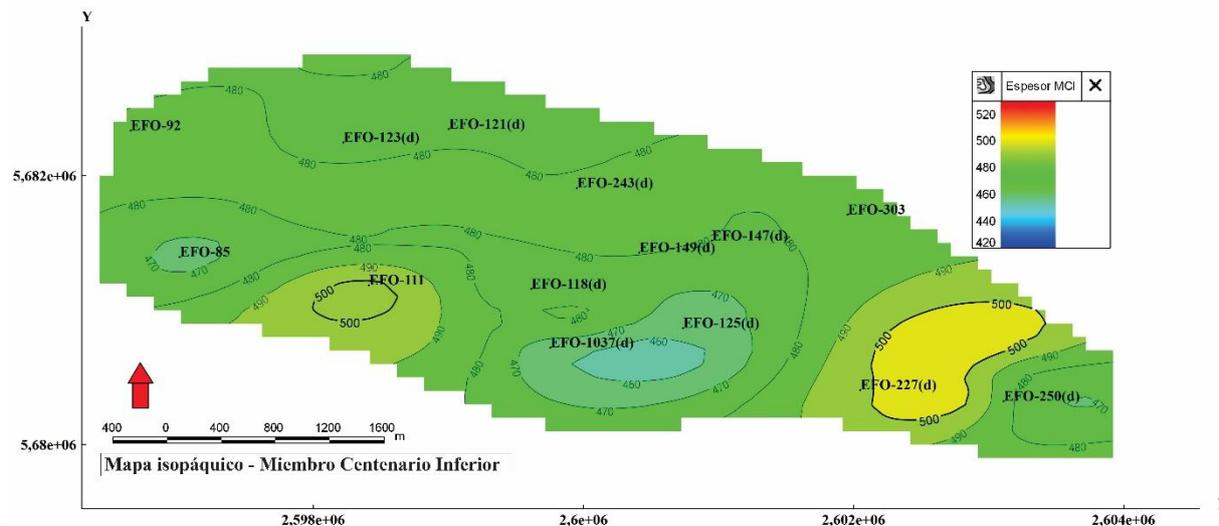


Figura 52. Mapa isopáquico del Miembro Centenario Inferior. El espesor de la unidad es regular en su extensión, con diferencias de potencia de 40 m aproximadamente, llegando a un espesor máximo de 500 m hacia el Este.

## 7.5 Mapas de isovalores

### 7.5.1 Mapa de espesor de arenas (Miembro Centenario Inferior)

El mapa de espesor de arenas se realizó a partir de valores de atributos de pozo como la sumatoria total del espesor de la electrofacies correspondientes a areniscas limpias (Fig. 53). Puede observarse en el mapa que el espesor de arenas varía considerablemente a lo largo del área de estudio, con una mayor acumulación de arenas en el pozo EFO-121(d) ubicado al Nornoroeste, mientras que los valores más bajos de espesor se encuentran hacia la parte centro Sur y hacia el Sureste. Hacia el Oeste y hacia el Noroeste los espesores rondan mayoritariamente valores entre 160 y 180 m.

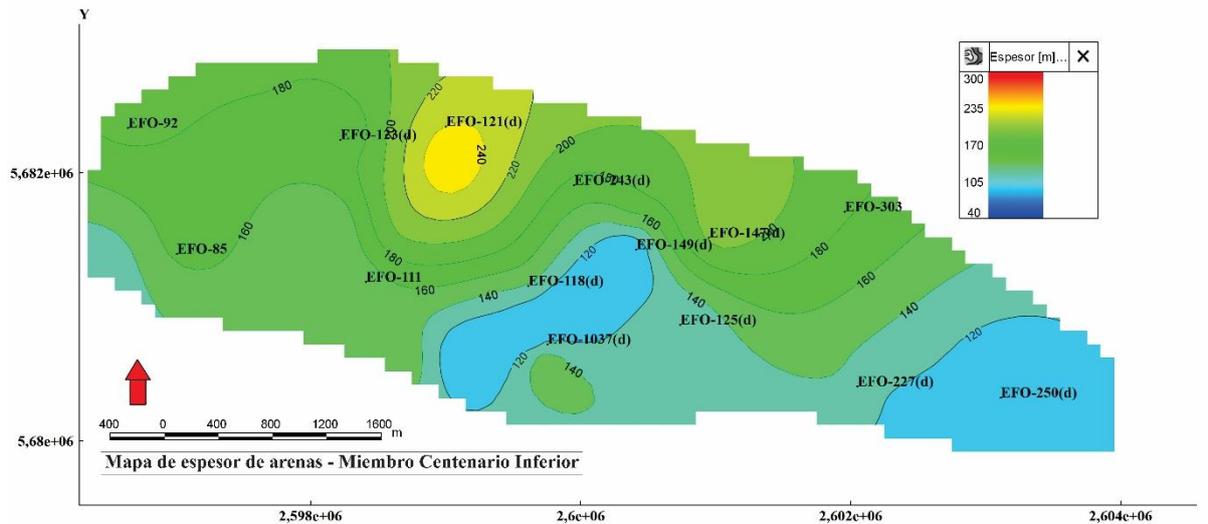


Figura 53. Mapa de espesores de arenas. Hacia el centro Norte se observa la mayor acumulación de arenas, mientras que hacia el Sur y Sureste hay menor proporción de arenas. Nuestra zona de interés se encuentra hacia el Oeste donde los espesores se aproximan a 160 m.

### 7.5.2 Mapa de espesor de arcillas (nivel sello en el Miembro Centenario Superior)

Una de las tareas principales de este estudio fue evaluar la presencia y efectividad de un sello hidráulico para la Formación Centenario del yacimiento EFO. Para esto, se realizó la sumatoria total de las arcillas presentes en el Miembro Centenario Superior, seleccionado como nivel sello, y se elaboró un mapa de isovalores que muestra la distribución y espesor de estos niveles arcillosos (Fig. 54). El nivel de interés se encuentra por encima del tope del Miembro Centenario Inferior y presenta en los registros de pozo características propias de las arcillas: sin deflexión en el SP, altos valores de GR, cruzamiento de las curvas densidad-neutrón y valores de resistividad mayores a las areniscas, lo que podría atribuirse a una elevada salinidad del agua de formación en las arenas. Las arcillas observadas en la Formación Centenario suelen ser masivas o presentar inclusiones arenosas, aunque tienen la característica de ser friables, lo que podría afectar su capacidad de sellado. En todos los pozos se observó que presenta intercalaciones de niveles arenosos de espesor variable.

El mapa de isovalores de espesor de arcillas refleja que la menor proporción de arcillas se localiza hacia el centro Norte del área de estudio, mientras que la mayor proporción de arcillas se localiza hacia el Suroeste.

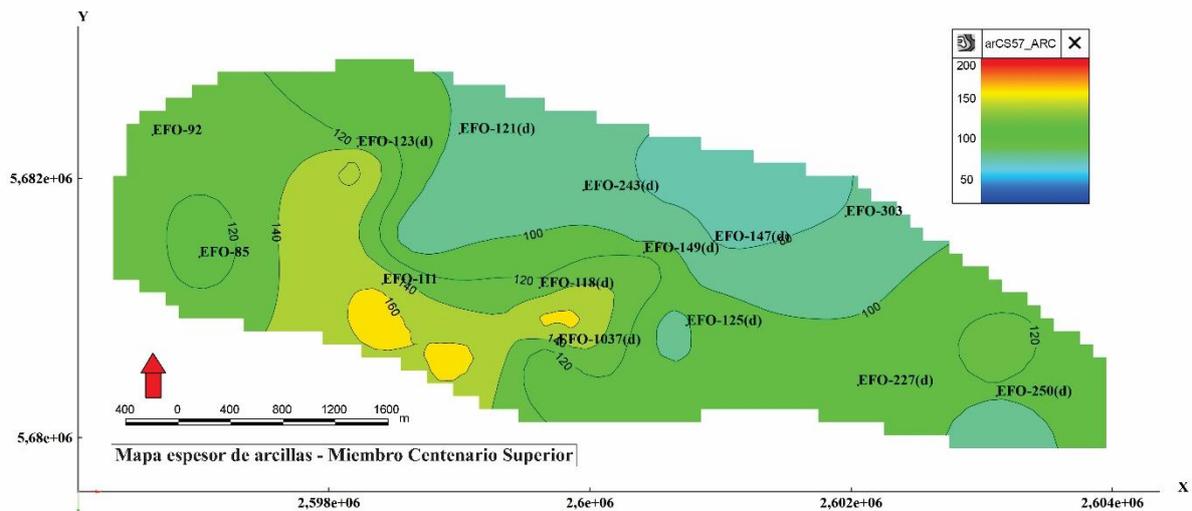


Figura 54. Mapa de espesor de las arcillas en el Miembro Centenario Superior, mostrando una mayor acumulación hacia el Sur suroeste. Nuestro intervalo de interés es cercano al pozo EFO-85, donde se observan arcillas de 120 a 140 m de potencia.

## 7.6 Ubicación del pozo

A partir de un polígono de 250 m x 250 m, se propone la posición objetivo en la Formación Centenario para la inyección de agua de retorno, la cual geográficamente se encuentra cercana al pozo EFO-85. El agua de retorno se encuentra almacenada en la planta de YPF, ubicada en las proximidades de dicho pozo, facilitando la logística de la operación. La ubicación propuesta para la inyección se encuentra aproximadamente sobre las coordenadas X: 2597400 e Y: 5681300 (Fig. 55).

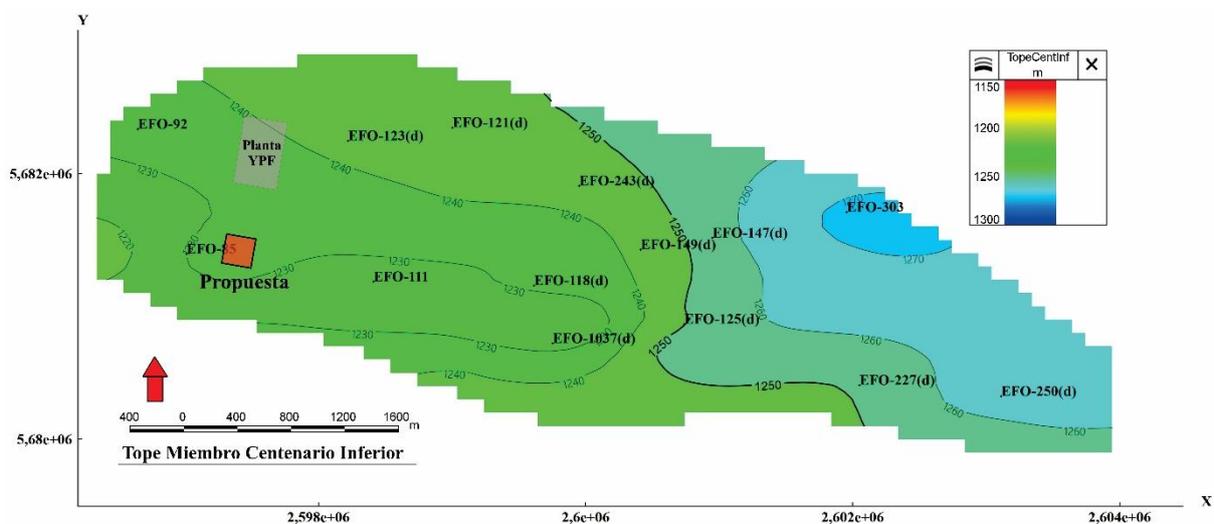


Figura 55. Ubicación propuesta para inyección de agua en el Miembro Centenario Inferior (cuadrado naranja).

Para definir la posición del pozo inyector se consideran varios factores clave basados en la información litológica y estructural disponible, que se presentan a continuación:

- Proximidad a la planta de YPF: la ubicación propuesta del pozo se encuentra estratégicamente cerca de la planta de YPF, donde se almacena el agua tratada. Esta cercanía es un factor importante, ya que facilita la logística del transporte y manejo del agua de inyección, lo cual reduce costos operativos y minimiza la complejidad del proceso.
- El área seleccionada presenta un buen espesor de arenas en el Miembro Centenario Inferior, con valores cercanos a los 160 m. Para garantizar la efectividad del sello, se definió utilizar la sumatoria de las arcillas presentes en todo el Miembro Centenario Superior, en lugar de considerar exclusivamente el nivel inmediato por encima del tope del Miembro Centenario Inferior. Este enfoque permite aprovechar la mayor continuidad y espesor de arcillas presentes en el Miembro Centenario Superior, cuyo rango de espesor total varía entre 120 y 140 m.
- Los niveles arenosos de mayor espesor o potencia dentro del Miembro Centenario Inferior se encuentran predominantemente hacia el techo de esta formación, especialmente desde la mitad hacia arriba. Para ello, se realizó un mapa de potencia de arenas de dicho nivel superior del Miembro Centenario Inferior, donde el espesor de arenas varía entre 120 y 130 m. Este rango de espesores garantiza un reservorio de buena capacidad para una inyección óptima (Fig. 56).

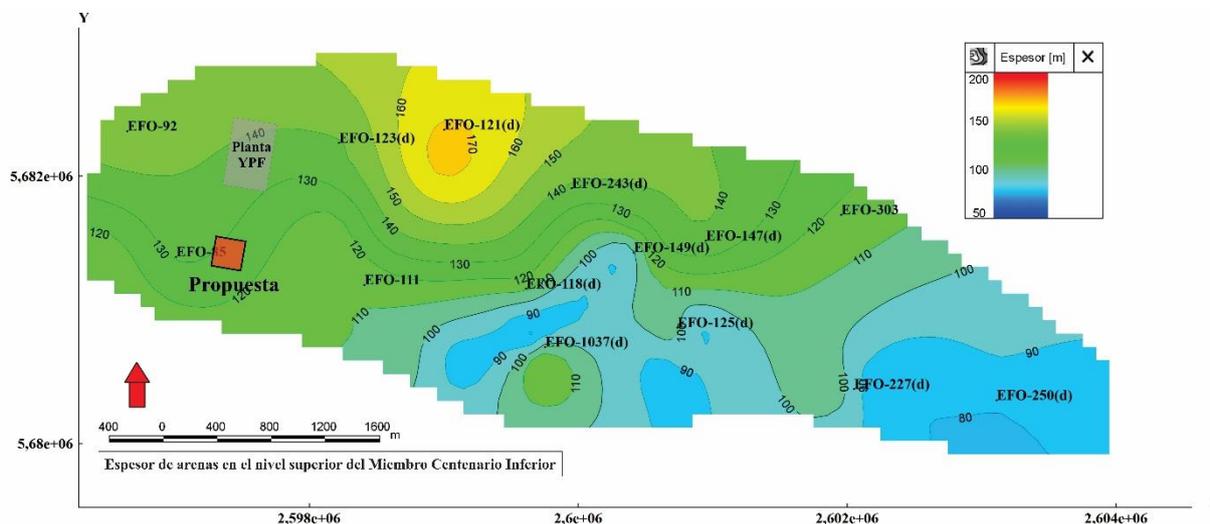


Figura 56. Espesor de arenas del nivel superior en el Miembro Centenario Inferior. En la ubicación propuesta (cuadrado naranja) el espesor de arenas del nivel superior del Miembro Centenario Inferior varía entre 120 y 140 m.

## 8 CONCLUSIONES

Este trabajo se enfocó en la caracterización estática de la Formación Centenario en el yacimiento EFO con el propósito de evaluar su potencial como reservorio para la reinyección

de agua de retorno o *flowback*. A través del análisis de perfiles de pozo y muestras de cutting, se obtuvieron datos preliminares sobre los niveles potenciales para reinyección y posibles sellos hidráulicos en la formación. Se definieron los límites de la Formación Centenario, tanto su tope como su base, así como el límite entre ambos miembros que la componen. En el pozo EFO-1037(d), el tope del Miembro Centenario Superior se ubicó a una profundidad de 1.216 m (MD), mientras que el tope del Miembro Centenario Inferior se ubicó a los 1.485 m (MD) y la base del Miembro Centenario Inferior se ubicó a los 1.965 m (MD).

Se define al Miembro Centenario Inferior como reservorio objetivo para inyección de agua tratada porque presenta mejores propiedades petrofísicas en sus arenas, las cuales se observan más limpias, cuarzosas, de granulometría fina a gruesa, con valores de porosidad efectiva entre 10% y 15%, y con niveles arenosos con espesores que superan los 10 m. En dicha unidad, las arenas se encuentran predominantemente sobre la mitad superior del Miembro Centenario Superior a lo largo del todo el área de estudio.

Respecto al sello hidráulico, se consideró como sello local a la sumatoria de las arcillas que se encuentran en el Miembro Centenario Superior. Los niveles arcillosos presentan buena continuidad lateral en EFO, aunque su continuidad vertical no es homogénea, mostrando espesores variables e intercalaciones con areniscas. Las arcillas, generalmente masivas, también presentan inclusiones arenosas, pero su friabilidad implica que son propensas a romperse bajo ciertas condiciones. Por otra parte, las intercalaciones con capas arenosas dentro del nivel arcilloso podrían complicar la efectividad del nivel sello, ya que las mismas podrían servir como vías de migración del agua inyectada.

Finalmente, se propone la ubicación del pozo sobre las coordenadas X: 2597400 e Y: 5681300 (Fig. 56), en el sector Oeste Suroeste del área de estudio, en cercanías al pozo EFO-85. La propuesta se basa en el análisis integral realizado, considerando tanto criterios técnicos como logísticos y económicos. La selección del sitio se justifica por la presencia de un alto estructural en el Miembro Centenario Inferior, lo que favorece la contención lateral del agua inyectada. Adicionalmente, se ha identificado un espesor significativo de arcillas por encima de este nivel, con valores aproximados de 120 a 140 m, que actuarían como sello hidráulico, contribuyendo a prevenir la migración vertical a otras formaciones.

## 9 BIBLIOGRAFÍA

- Aguirre-Urreta, M. (2024). The Cretaceous of the Neuquén Basin in the Central Andes. Geological Society, London, Special Publications. 545. 10.1144/SP545-2023-101.
- Arregui, C., Carbone, O. y Martínez, R.S. (2011a). El Grupo Cuyo (Jurásico Temprano - Medio) en la Cuenca Neuquina. En: Leanza, H., Arregui, C., Carbone, O., Danieli, J.C. y Vallés, J.M. (Eds.), Relatorio del XVIII Congreso Argentino. Asociación Geológica Argentina, Neuquén, p. 77-89.
- Arregui, C., Carbone, O. y Sattler, F. (2011b). El Grupo Lotena (Jurásico Medio - Tardío) en la Cuenca Neuquina. En: Leanza, H., Arregui, C., Carbone, O., Danieli, J.C. y Vallés, J.M. (Eds.), Relatorio del XVIII Congreso Argentino. Asociación Geológica Argentina, Neuquén, p. 91-98.
- Bettini, F.H. (1984). Pautas sobre cronología estructural en el área del cerro Lotena, cerro Granito y su implicancia en el significado de la dorsal del Neuquén, provincia del Neuquén. 9º Congreso Geológico Argentino, Actas 2: 163-169.
- Brisson, I. y Veiga, R. (1999). Gira de campo, Cuenca Neuquina. YPF, informe inédito.
- Cabaleiro, A., Cazau, L., Lasalle, D., Penna, E. y Robles, D. (2002). Los reservorios de la Formación Centenario. En: Schiuma, M., Hinterwimmer, G. y Vergani, G. (Eds.), Rocas reservorio de las cuencas productivas de la Argentina. V Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, IAPG, p. 643-661.
- Casadío, S. y Montagna, A.O. (2015). Estratigrafía de la cuenca Neuquina. En: Ponce, J.J., Montagna, A.O. y Carmona, N. (Eds.), Geología de la cuenca Neuquina y sus sistemas petroleros. Una mirada integradora desde los afloramientos al subsuelo. Fundación YPF y Universidad Nacional de Río Negro, p. 8-21.
- Digregorio, J.H. (1972). Neuquén. En: Leanza, A.F. (Ed.): Geología Regional Argentina. Academia Nacional de Ciencias, p. 439-505. Córdoba.
- Echevarría, C. 2018. Yacimiento El Mangrullo. En: Schiuma, M., Hinterwimmer, G. y Vergani, G. (Eds.), Rocas reservorio de las cuencas productivas de la Argentina. V Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, IAPG, p. 697-709.
- Folguera, A., Introcaso, A., Giménez, M., Ruiz, F., Martinez, P., Tunstall, C., García Morabito, E. y Ramos, V.A. (2007). Crustal attenuation in the Southern Andean retroarc (38°

- 39°30' S) determined from tectonic and gravimetric studies: The Lonco-Luán asthenospheric anomaly. *Tectonophysics*. 439: 129-147.
- Franzese, J.R. y Spalletti, L.A. (2001). Late Triassic-early Jurassic continental extension in southwestern Gondwana: tectonic segmentation and pre-break-up rifting. *Journal of South American Earth Sciences*, 14, 4-2001, p. 257-270.
- Franzese, J.R., Spalletti, L.A., Gómez Pérez, I. y Macdonald, D. (2003). Tectonic and paleoenvironmental evolution of Mesozoic sedimentary basins along the Andean foothills of Argentina (32°-54°S). *Journal of South American Earth Sciences*, 16, p. 81-90.
- Freeze, R.A. y Cherry, J.A. (1979). *Groundwater*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall. Chapter 2: Physical Properties and principles.
- Garduza Rueda, V.M. (2019). Manual de Registros Geofísicos de Pozo y algunas aplicaciones. Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros, A.C. Volumen LXI, Número 2.
- Giampaoli, P. y Brisson, I. (2022). Chapter 31 - Structural styles, tectonic evolution, and petroleum system of transverse pre-Andean structures: examples from the Cuyo and Neuquén basins. En: Zamora, G. y Mora, A. (Eds.), *Andean Structural Styles: A Seismic Atlas*. Elsevier. p. 399-413.
- Groeber, P. (1946). Observaciones geológicas a lo largo del meridiano 70. 1. Hoja Chos Malal. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 1(3), p. 177-208.
- Gulisano, C.A., Gutiérrez, Pleimling, A. y Digregorio, R.E. (1984). Esquema estratigráfico de la secuencia jurásica del oeste de la provincia del Neuquén. 9º Congreso Geológico Argentino. Actas 1: 236-259.
- Howell, J.A., Schwarz, E., Spalletti, L.A. y Veiga, G.D. (2005). The Neuquén Basin: an overview. *Geological Society, Special Publications*, 252, p. 1-14.
- Khatchikian, A. (2011). *Registros de pozo: principios y aplicaciones*. 1ª ed. 184 p.
- Leanza, H.A., Sattler, F., Martínez, R.S. y Carbone, S. (2011). La Formación Vaca Muerta y equivalentes (Jurásico Tardío - Cretácico Temprano) en la Cuenca Neuquina. En: Leanza, H., Arregui, C., Carbone, O., Danieli, J.C. y Vallés, J.M. (Eds.), *Relatorio del XVIII Congreso Argentino*. Asociación Geológica Argentina, Neuquén, 113-129.

- Llambías, E.J. y Sato, A.M. (2011). Ciclo Gondwánico: La provincia magmática Choiyoi en Neuquén. En: Leanza, H., Arregui, C., Carbone, O., Danieli, J.C. y Vallés, J.M. (Eds.), Relatorio del XVIII Congreso Argentino. Asociación Geológica Argentina, Neuquén, p. 53-62.
- Malone, P., Saavedra, C., Vergani, G., Ferrero, J.C., Limeres, M. y Schiuma, M. (2002). Los reservorios del Grupo Cuyo Superior. En: Schiuma, M., Hinterwimmer, G. y Vergani, G. (Eds.), Rocas reservorio de las cuencas productivas de la Argentina. V Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, IAPG, p. 277-302.
- Montagna, A.O. y Astesiano, D. (2015). Caracterización de las rocas del sistema petrolero a partir de registros de pozo de pozos. En: Ponce, J.J., Montagna, A.O. y Carmona, N. (Eds.), Geología de la cuenca Neuquina y sus sistemas petroleros. Una mirada integradora desde los afloramientos al subsuelo. Fundación YPF y Universidad Nacional de Río Negro, p. 128-148.
- Mosquera, A. (2008). Mecánica de deformación de la Cuenca Neuquina (Triásico-Terciario). Tesis Doctoral. Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales.
- Mosquera, A. y Ramos, V.A. (2006). Intraplate deformation in the Neuquén Embayment. Special Paper of the Geological Society of America. 407: 97-123.
- Mosquera, A., Silvestro, J., Ramos, V., Alarcón, M. y Zubiri, M. (2011). La estructura de la Dorsal de Huincul. Geología y recursos naturales de la provincia de Neuquén. Relatorio del XVIII Congreso Argentino. Asociación Geológica Argentina, Neuquén. 385-397.
- Muravchik, M., D'Elia, L., Bilmes, A. y Franzese, J.R. (2011). Syn-eruptive/inter-eruptive relations in the syn-rift deposits of the Precuyano Cycle, Sierra de Chacaico, Neuquén Basin, Argentina. *Sedimentary Geology*, 238, p. 132-144.
- Pazos, P.J., Comerio, M., Fernández, D.E., Gutiérrez, C., González Estebenet, M.C. y Heredia, A.M. (2020). Sedimentology and Sequence Stratigraphy of the Agrio Formation (Late Valanginian-Earliest Barremian) and the Closure of the Mendoza Group to the North of the Huincul High. En: Kietzmann, D. y Folguera, A. (Eds.). *Opening and Closure of the Neuquén Basin in the Southern Andes*. Springer Earth System Sciences. 237-265.

- Reading, H.G. y Levell, B.K. (1996). Controls on the sedimentary rock record. En: Reading, H.G. (Ed.), *Sedimentary environments: processes, facies and stratigraphy*. Third Edition. Department of Earth Sciences, University of Oxford, p. 5-36.
- Rock Flow Dynamics (2024). tNavigator. [Software de simulación de reservorios]. Disponible bajo licencia comercial en <https://rfdyn.com>.
- Scazziota, F. (2012). Geología, estructura y análisis del potencial exploratorio en el bloque Lago Pellegrini, cuenca Neuquina, Río Negro. *Petrotecnia*, p. 16-36.
- Serra, O. (1986). *Fundamental of Well Log Interpretation*. Vol. 2: the interpretation of logging data. *Developments in Petroleum Science*, 15B. Elsevier, ISBN: 0444426205.
- Silvestro, J. y Zubiri, M. (2008). Convergencia Oblicua: modelo estructural alternativo para la Dorsal Neuquina (39°S) – Neuquén. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 63 (1), p. 49-64.
- Spalletti, L., Arregui, C. y Veiga, G.D. (2011a). La Formación Tordillo y equivalentes (Jurásico Tardío) en la Cuenca Neuquina. En: Leanza, H., Arregui, C., Carbone, O., Danieli, J.C. y Vallés, J.M. (Eds.), *Relatorio del XVIII Congreso Argentino*. Asociación Geológica Argentina, Neuquén, p. 99-111.
- Spalletti, L., Veiga, G.D., y Schwarz, E. (2011b). La Formación Agrio (Cretácico Temprano) en la Cuenca Neuquina. En: Leanza, H., Arregui, C., Carbone, O., Danieli, J.C. y Vallés, J.M. (Eds.), *Relatorio del XVIII Congreso Argentino*. Asociación Geológica Argentina, Neuquén, p. 145-160.
- Vergani, G., Arregui, C. y Carbone, O. (2011). Sistemas petroleros y tipos de entrapamientos en la Cuenca Neuquina. *Geología y Recursos Naturales de la Provincia de Neuquén: XVIII Congreso Geológico Argentino*, p. 645-656.
- Zamora Valcarce, G., Zapata, T., Pino, D., y Ansa, A. (2006). Structural evolution and magmatic characteristics of the Agrio fold-and-thrust belt. *Geological Society of America Bulletin*. 407: 125-145.