

2024



**Estudio sobre la posibilidad de almacenaje
de hidrógeno en depósitos evaporíticos
del Mb. Troncoso Superior, Fm. Huitrín, en
un área ubicada al Noroeste de la Cuenca
Neuquina**

Autor: Bruno S. Balda

Director: Msc. Joaquín E. Cardozo

Codirectora: Lic. Sheyla E. Iglesias

RESUMEN

En Argentina, se está promoviendo la diversificación de la matriz energética mediante el incremento de la producción de energías renovables (EERR), esencial para reducir los gases de efecto invernadero. La generación de energía a partir de fuentes renovables se ha visto impulsada por factores como una legislación favorable, incentivos fiscales, prioridad en el despacho de energía renovable y la continua disminución de costos en la producción de energía eólica y solar. La provincia del Neuquén cuenta con 15 proyectos de generación eléctrica renovable, distribuidos por todo el territorio, con una capacidad total de aproximadamente 850 MW.

El objetivo de este estudio es evaluar las características geológicas de los depósitos evaporíticos del Mb. Troncoso Superior (MTS) en el Norte de la Cuenca Neuquina, con el fin de determinar la viabilidad técnica de construir cavernas de sal para almacenar hidrógeno verde. El hidrógeno provendría del proceso de electrólisis del agua utilizando el excedente energético renovable generado, contribuyendo a la transición energética y a la reducción de los gases de efecto invernadero.

Para lograr este objetivo, se analizaron características estratigráficas y estructurales mediante información sísmica y se estudió la composición litológica e impurezas a través de datos de pozo. Además, se realizó una exhaustiva revisión bibliográfica para contextualizar el proyecto y comprender el marco geológico y energético en el que se inscribe.

Con base en los datos analizados, se identificaron dos áreas aptas para la construcción de cavernas: una con una superficie de 545.000 m² y espesores de hasta 215 m, y otra con un área de 820.000 m² y espesores de hasta 203 m. En estas áreas, sería posible almacenar una masa de 5547 toneladas de H₂ y una energía de 182 GWh.

Palabras clave: energías renovables, hidrógeno verde, interpretación sísmica, cavernas salinas.

ABSTRACT

In Argentina, the diversification of the energy matrix is being promoted through the increase in the production of renewable energy (RE), which is essential for reducing greenhouse gases. The generation of energy from renewable sources has been driven by factors such as favorable legislation, tax incentives, priority in dispatching renewable energy, and the continued reduction in the costs of wind and solar energy production. The province of Neuquén has 15 renewable power generation projects distributed throughout its territory, with a total capacity of approximately 850 MW.

The objective of this study is to evaluate the geological characteristics of the evaporitic deposits of the Upper Troncoso Member (UTM) in the northern part of the Neuquén Basin, in order to determine the technical feasibility of constructing salt caverns for the storage of green hydrogen. The hydrogen would be produced through the electrolysis of water using surplus renewable energy, thereby contributing to the energy transition and the reduction of greenhouse gases.

To achieve this objective, stratigraphic and structural characteristics were analyzed using seismic data, and the composition (lithologies and impurities) was studied through well data.

Based on the analyzed data, two areas suitable for cavern construction were identified: one with a surface area of 545,000 m² and thicknesses of up to 215 m, and another with an area of 820,000 m² and thicknesses of up to 203 m where it would be possible to store a mass of 2799 tons of H₂ and energy amounting to 92 GWh.

Keywords: renewable energies, green hydrogen, seismic interpretation, salt caverns.

RECONOCIMIENTOS Y DEDICATORIA

En primer lugar, quiero agradecer a mis padres y hermanas, quienes han sido pilares fundamentales no solo en mi recorrido universitario, sino también a nivel humano. Alcanzar este objetivo habría sido imposible sin el constante apoyo que recibí de ustedes.

A mis abuelos, Elsa y Diego, por estar siempre, por su amor y compañía.

A mi abuelo Pichón por siempre transmitirme tu cariño y apoyo.

A mi novia Emilia por acompañarme durante toda esta etapa de finalización de mis estudios.

A mis amigos de toda la vida, con los que crecí y me acompañan hace muchos años, estando presentes en las buenas y las malas.

A mis amigos y compañeros de la universidad, sin dudas, una de las mayores riquezas que me llevo de esta experiencia es haberla vivido con ustedes.

A Joaquín Cardozo, por aceptar dirigir este trabajo, por tu constante compromiso en enseñarme y permitirme conocer una dinámica de trabajo. Gracias por guiarme en este proceso de aprendizaje, por todas las horas dedicadas y por brindarme tus conocimientos y experiencias.

A Sheyla Iglesias, no solo por tu gran contribución en el desarrollo de esta tesis, sino también por tu gran vocación docente. Gracias por la paciencia y la dedicación durante la carrera y en este trabajo final.

A la Universidad Nacional del Comahue, por su educación pública y de calidad, brindada por excelentes profesores que fueron fundamentales en mi formación académica.

A la empresa YPF S.A. por brindarme los materiales y la información del área de estudio.

A Guillermo Corona y Jan Barmuta por su ayuda y capacitación.

Al jurado evaluador Emiliano Santiago, Nicolás Carrizo y Rayén Ferreyro Elizondo por sus valiosas correcciones, sugerencias y comentarios.

Por último, a mis perritas Ameli y Carmela, por estar incondicionalmente a mi lado.

Esto no hubiera sido posible sin cada uno de ustedes, gracias.

Índice

RESUMEN	2
RECONOCIMIENTOS Y DEDICATORIA	3
INTRODUCCIÓN	5
Objetivos.....	10
Área de estudio	11
ALMACENAMIENTO GEOLÓGICO DE GAS	11
Almacenamiento en cavernas de sal	13
Depósitos de sal.....	13
Caracterización de la caverna	15
Construcción de la caverna	15
MARCO GEOLÓGICO	17
Estratigrafía	18
Estructura	20
Regiones Morfoestructurales.....	24
Modelo sedimentológico Fm. Hutrín	25
DESARROLLO	36
Interpretación de perfiles y correlación de pozos	36
Interpretación sísmica	41
MODELO CONCEPTUAL	59
CÁLCULOS VOLUMÉTRICOS	60
FACTIBILIDAD, SEGURIDAD Y MEDIOAMBIENTE	62
CONCLUSIONES	68
REFERENCIAS	69
ANEXO	74
Descripción de <i>Cutting</i> de Pozo Exploratorio en la zona de estudio	74

INTRODUCCIÓN

Actualmente Argentina está experimentando un importante crecimiento en la producción de EERR fundamentalmente a partir de fuentes de energía eólica y solar, con una potencia instalada en la región del Comahue de 287 MW la que se distribuye en un 88% en energía eólica, un 11% en energía solar y el 1% restante es generado a partir de la bioenergía^I. Este crecimiento se debe en parte a la estrategia de diversificar la matriz energética y volverla más limpia, contribuyendo a la mitigación de gases de efecto invernadero, y en parte al potencial energético renovable que ofrece la geografía argentina tanto en energía solar en el Noroeste como eólica en la Patagonia (Fig. 1). Cardozo (2024) estima un factor de carga del 40% para un posible parque eólico ubicado en el Noroeste de la Cuenca Neuquina con un valor de energía eólica de 490.560 MWh/año y una producción de hidrógeno asociada de 8.200 Ton_{H₂}. En este contexto, diversos factores favorecen la producción de energía a partir de fuentes renovables como legislaciones que exigen que hasta el 8% de la energía consumida a nivel nacional sea generada a partir de EERR, así como incentivos fiscales para que las pequeñas y medianas empresas (PyMEs) instalen paneles solares. Además, se otorga prioridad al despacho de energía eléctrica proveniente de centrales renovables sumado a una continua disminución en los costos asociados con la producción de energía eólica y solar (IRENA, 2021).

Estos recursos renovables están presentes en importantes extensiones que, a su vez, presentan baja densidad poblacional, por lo que vuelve interesante estudiarlas con el objetivo de aprovechar al máximo el potencial energético. La provincia del Neuquén cuenta con quince proyectos de generación eléctrica a partir de fuentes renovables en todo el territorio, que acumulan una potencia de aproximadamente 850 MW^{II}, por lo que resulta interesante considerar una estrategia para aprovechar el recurso energético mediante la producción de hidrógeno a través de electrólisis del agua (conocido como hidrógeno verde) y su almacenamiento in situ en cavernas de sal para uso industrial. Este método de almacenamiento se elige debido que en el subsuelo se permite conservar grandes volúmenes de hidrógeno de manera efectiva, proporcionando una solución confiable para las necesidades industriales y energéticas, ya que su costo es de 3 a 4 veces menor a otros métodos (Moyano Tirado, 2018). Por ejemplo, esto podría aplicarse en las destilerías cercanas de Luján de Cuyo o Plaza Huincol, así como en centrales térmicas (Cardozo, 2024). El objetivo es maximizar la utilización del recurso eólico, utilizando la energía eléctrica generada tanto para la conexión a la red como para la producción de hidrógeno verde, aprovechando los excedentes de energía que no puedan ser inyectados a la red eléctrica para la generación del hidrógeno que será almacenado en cavernas de sal para que el mismo pueda ser extraído conforme sea requerido (Fig. 2).

^I(Cammesa, 2024)

https://cammesaweb.cammesa.com/erenovables/?doing_wp_cron=1715859489.7676949501037597656250

^{II}(Ministerio de Energía y Recursos Naturales de Neuquén, 2024)

<https://www.energianeuquen.gob.ar/neuquen-continua-desarrollando-su-potencial-energetico>

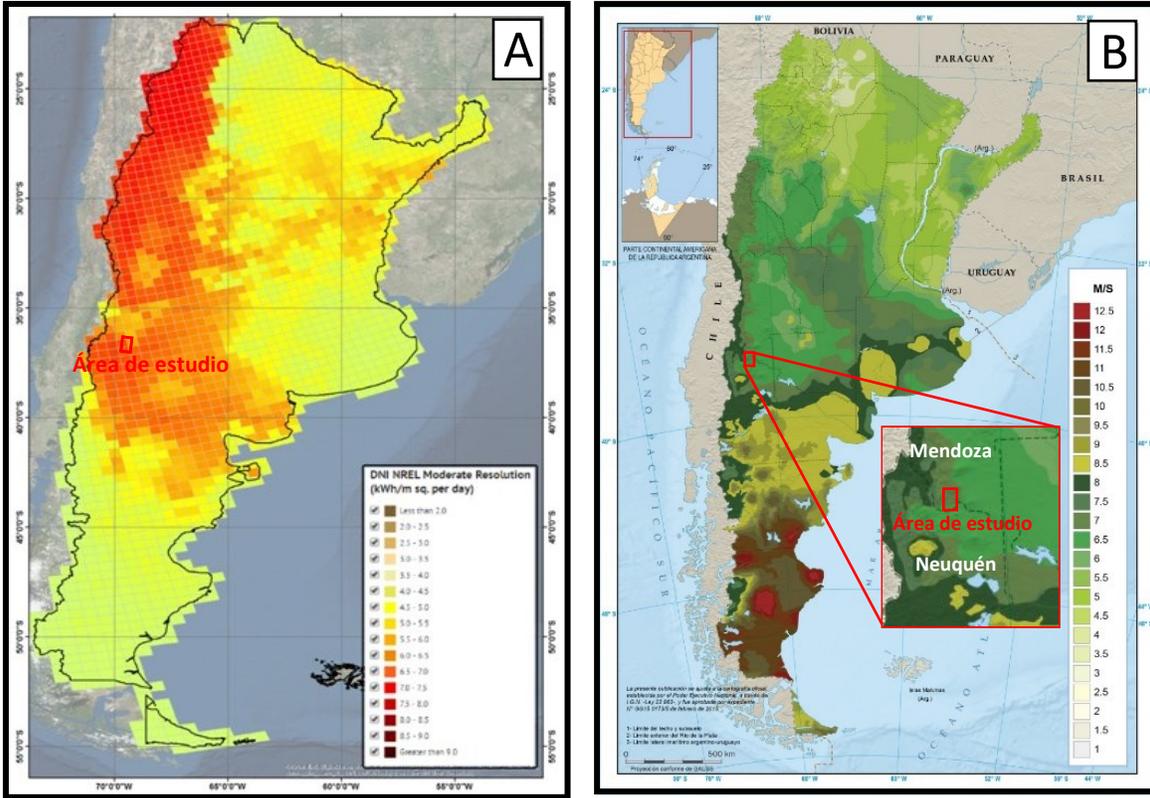


Figura 1. A) Carta de irradiación solar anual [MWh/m^2] (modificado de Argentina.gov.ar, 2017). B) Distribución de la velocidad del viento [m/seg] (modificado de Fundación YPF, 2015).

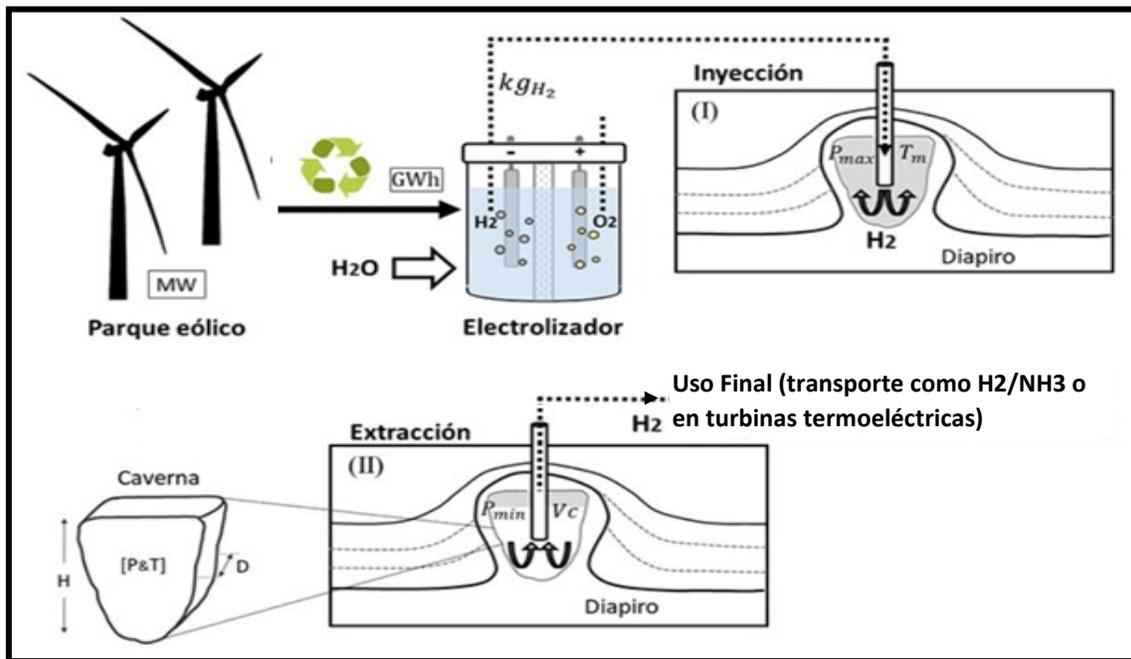


Figura 2. Esquema de producción, inyección y extracción del hidrógeno verde (modificado de El Mundo, 2023).

Hidrógeno

Es el primer elemento en la tabla periódica, siendo el más ligero y abundante de todos. Presenta número atómico 1 y una masa atómica de 1,008u. En condiciones estándar, se encuentra en estado molecular, formando H₂. No constituye un recurso energético debido a que no se encuentra aislado en la naturaleza con frecuencia, por lo que su obtención se da a partir de la producción de energía fósil, nuclear o renovables. Este elemento se lo puede clasificar con distintos colores según su origen o según su método de producción, como se menciona en la Tabla 1. Además de producir una gran cantidad de energía por unidad de masa, su combustión no genera gases de efecto invernadero, siendo agua en forma de vapor el subproducto resultante por lo que se lo considera un combustible amigable para el medio ambiente, contrarrestando el calentamiento global. Es por esto por lo que se posiciona al hidrógeno verde como un vector energético, por lo que el estudio de diversas formas de almacenarlo resulta importante para luego ser transportado y utilizado cuando se lo requiera por las diferentes industrias.

El objetivo se centra en aprovechar parcial o totalmente la energía eléctrica generada por los parques eólicos para el proceso de electrólisis del agua. Este proceso se genera al pasar una corriente eléctrica a través de un electrolizador^{III} para realizar una reacción no espontánea. La reacción de interés, que requiere de un aporte energético por su naturaleza endotérmica, es la descomposición del agua en hidrógeno y oxígeno.

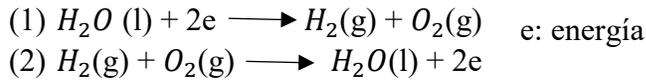
Tabla 1. Tipos de hidrógeno según su origen o producción.

Hidrógeno verde	Hidrógeno gris	Hidrógeno azul	Hidrógeno negro
Se genera mediante la electrólisis del agua utilizando EERR.	Se extrae del metano, sin capturar el CO ₂ residual.	Se extrae del metano, pero si se captura el CO ₂ .	Se obtiene al calentar hulla o lignito. Es el más dañino al medio ambiente.
Hidrógeno rosa	Hidrógeno turquesa	Hidrógeno amarillo	Hidrógeno blanco
Se genera mediante electrólisis del agua utilizando energía nuclear.	Se genera mediante la pirólisis del metano, generando carbón sólido como residuo.	Se genera mediante electrólisis de agua a partir de fuentes eléctricas (renovables o no).	Se encuentra aislado en la naturaleza, producto de la interacción entre rocas y agua.

^{III} un electrolizador de agua consta de un electrolito, electrodos, sistema de suministro de electricidad y sistemas auxiliares para el suministro y recogida de reactivos y productos (Barco-burgos *et al.*, 2020).

Electrólisis

Como se mencionó previamente, la electrólisis del agua es clave para la producción de hidrógeno verde utilizando las EERR. Este proceso consiste en la separación del hidrógeno y el oxígeno utilizando la electricidad. A su vez, cabe destacar que el proceso puede ser inverso, lo que significa que a partir del hidrógeno y el oxígeno en estado gaseoso se puede obtener agua y energía, lo que queda explícito en las ecuaciones 1 y 2.



En estas ecuaciones queda demostrado que estas reacciones solo producen oxígeno e hidrógeno o agua y electricidad, sin emitir ningún gas de efecto invernadero, verificando que se tratan de procesos limpios (Párraga Mora, 2021).

Electrolizadores alcalinos

Estos sistemas son fáciles de adquirir, tienen una larga durabilidad (hasta 90,000 horas de uso), y el costo de capital es relativamente bajo. Esto se debe, en parte, a que no requieren metales nobles y a la madurez de los componentes de la pila. Sin embargo, la presión de funcionamiento (menor a 30 bar) y la baja densidad de corriente (0,25-0,45 A/cm²) hacen que la producción de hidrógeno sea más costosa y que el tamaño de los equipos aumente (Párraga Mora, 2021).

Electrolizadores PEM (Polymer Electrolyte Membrane)

A diferencia de la tecnología alcalina, este equipamiento posee una mayor densidad de potencia, una mayor flexibilidad en el funcionamiento dinámico con respuestas más rápidas y una mayor capacidad de trabajar a presiones más altas (hasta 200 bares). Además, la pureza del hidrógeno tras el secado es superior al 99.99% debido a que la membrana del electrolito polimérico presenta una permeabilidad cruzada ^{IV} muy baja.

Las desventajas de este tipo de tecnología es que es incipiente y actualmente es aplicada a proyectos de pequeña escala, aunque el avance en las investigaciones en cuanto a la simplificación del sistema y la reducción de los costos de producción utilizando materiales menos costosos y procesos de fabricación de pilas más sofisticados ha generado que se considere a esta tecnología en mercados comerciales de mayor escala.

Además, la vida útil de estos sistemas es menor que en los electrolizadores alcalinos, con una duración de entre 20.000 h a 60.000 h (Párraga Mora, 2021).

Electrolizadores de óxidos sólidos

Su principal ventaja respecto a las tecnologías descriptas anteriormente es que la temperatura de funcionamiento es significativamente más alta, con rangos de temperaturas desde 650°C hasta 1000°C, aumentando así la cinética del proceso haciéndolo más eficiente.

Como consecuencia de trabajar a altas temperaturas, los materiales que lo componen presentan una amplia degradación respecto a tecnologías que funcionan con menor temperatura, siendo esta

^{IV} La permeabilidad cruzada se refiere a la capacidad de una sustancia para pasar a través de una membrana o barrera. En este caso, “permeabilidad cruzada muy baja” significa que la membrana tiene una capacidad muy limitada para dejar pasar ciertas sustancias de un lado al otro. 8

problemática, junto con el desarrollo de nuevos materiales, el principal foco de las investigaciones para lograr la comercialización de estos electrolizadores (Párraga Mora, 2021).

Como se mencionó previamente, el hidrógeno es el elemento más abundante, pero solo se encuentra en estado puro en la naturaleza como hidrógeno blanco, que se forma por la interacción entre el agua y los minerales, transitando actualmente etapas de exploración y explotación emergentes, por lo que se lo puede obtener artificialmente de diversas formas. Actualmente, solo el 4% del hidrógeno generado se produce a través de la electrólisis del agua, por lo que el 96% del total es generado a través de combustibles fósiles (Fig. 3A). En el año 2019 se consumieron a nivel mundial alrededor de 14 millones de toneladas de petróleo, siendo un 21% mayor que en el año 2009, y con una expectativa de consumo de petróleo de hasta 18,3 millones de toneladas para el año 2035, generando gran parte de los gases de efecto invernadero junto con la combustión de gas natural y carbón, mientras que los procesos que aportan a la generación de electricidad con el fin de producir la electrólisis del agua (representados en verde en la figura 3B) representan una pequeña parte de los procesos de generación de H₂ (Fig. 3B). Se estima que la producción de combustibles fósiles genera alrededor de 500 millones de toneladas de CO₂ que son liberados a la atmósfera (Jiménez Sáez, 2020).

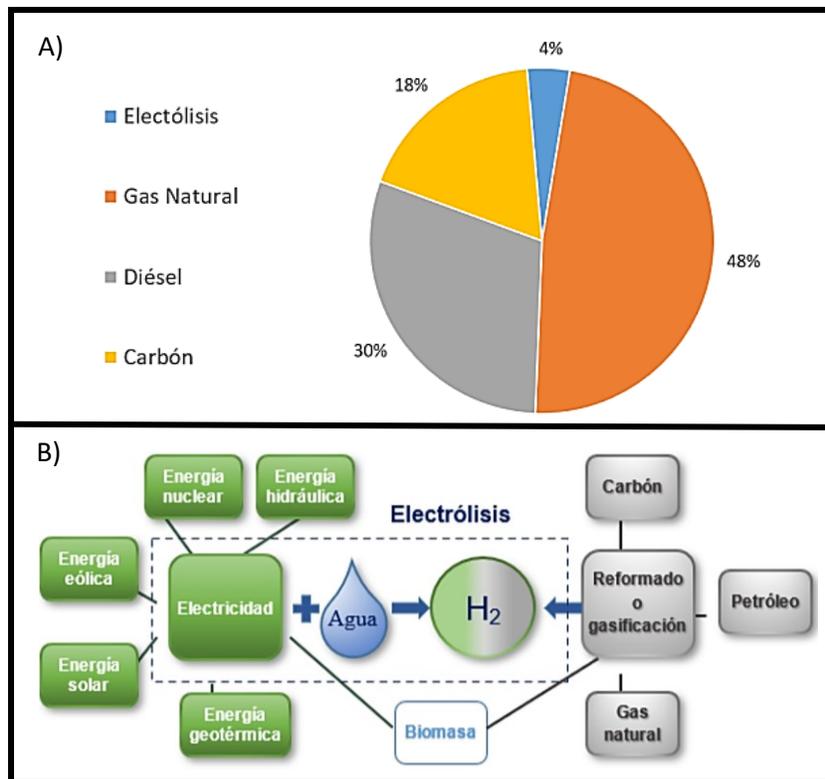


Figura 3. A) Materias primas utilizadas para la producción de hidrógeno (Jiménez Sáez, 2020); B) Esquema de la generación de hidrógeno según su fuente de elaboración propia (Párraga Mora, 2021).

En este estudio se analizará la factibilidad de la generación de cavernas en depósitos evaporíticos del Mb. Troncoso Superior de la Fm. Huitrín como posible sistema de almacenamiento, analizando mediante datos sísmicos y de pozos, las zonas aptas para el desarrollo de estas.

OBJETIVOS

Objetivo general

Evaluar el potencial de almacenaje de hidrógeno en los depósitos evaporíticos del Mb. Troncoso Superior en un área ubicada al Noroeste de la Cuenca Neuquina.

Objetivos específicos

- Definir el marco geológico de manera tal que permita el entendimiento de los depósitos evaporíticos y su evolución en el tiempo para la zona de interés.
- Establecer correlaciones entre pozos y de ser posible definir facies de las distintas sales para conocer su composición y espesor de sales solubles e impurezas (clásticos, anhidrita).
- Caracterización geológica de los depósitos evaporíticos del Mb. Troncoso Superior (espesores, solubilidad de las sales, profundidad, etc.).
- Interpretar el dato sísmico del área, poniendo especial foco en el Mb. Troncoso Superior para tener detalle sobre la estructura en general y las principales fallas que atraviesen los depósitos salinos de interés.
- Definir zonas aptas para la construcción de reservorios (cavernas) a partir de un análisis de factibilidad geológica tal como profundidad, grado de fracturamiento, estabilidad geomecánica, pureza de las sales, etc.
- Analizar factibilidad desde el punto de vista de la seguridad y el medio ambiente.
- Determinar el volumen probabilístico P10, P50 y P90 de H₂ a almacenar y la cantidad de energía que representa cada uno de los escenarios.

ÁREA DE ESTUDIO

Identificada como área de interés con base en Cardozo (2024), se encuentra al Sudoeste de Mendoza y al Norte de Neuquén. Comprende una superficie de 430 km² delimitada en la Figura 5, ubicada al Norte del Río Colorado, en la región Noroeste de la Cuenca Neuquina. En relación con las unidades morfoestructurales de la Cuenca Neuquina, el área se sitúa principalmente en la Plataforma Externa al Norte del Alto de los Chihuidos al Sur con la Faja Plegada en el margen occidental. Además, está situada a 35 km al Este de Barrancas y a 45 km al Noreste del Volcán Tromen.

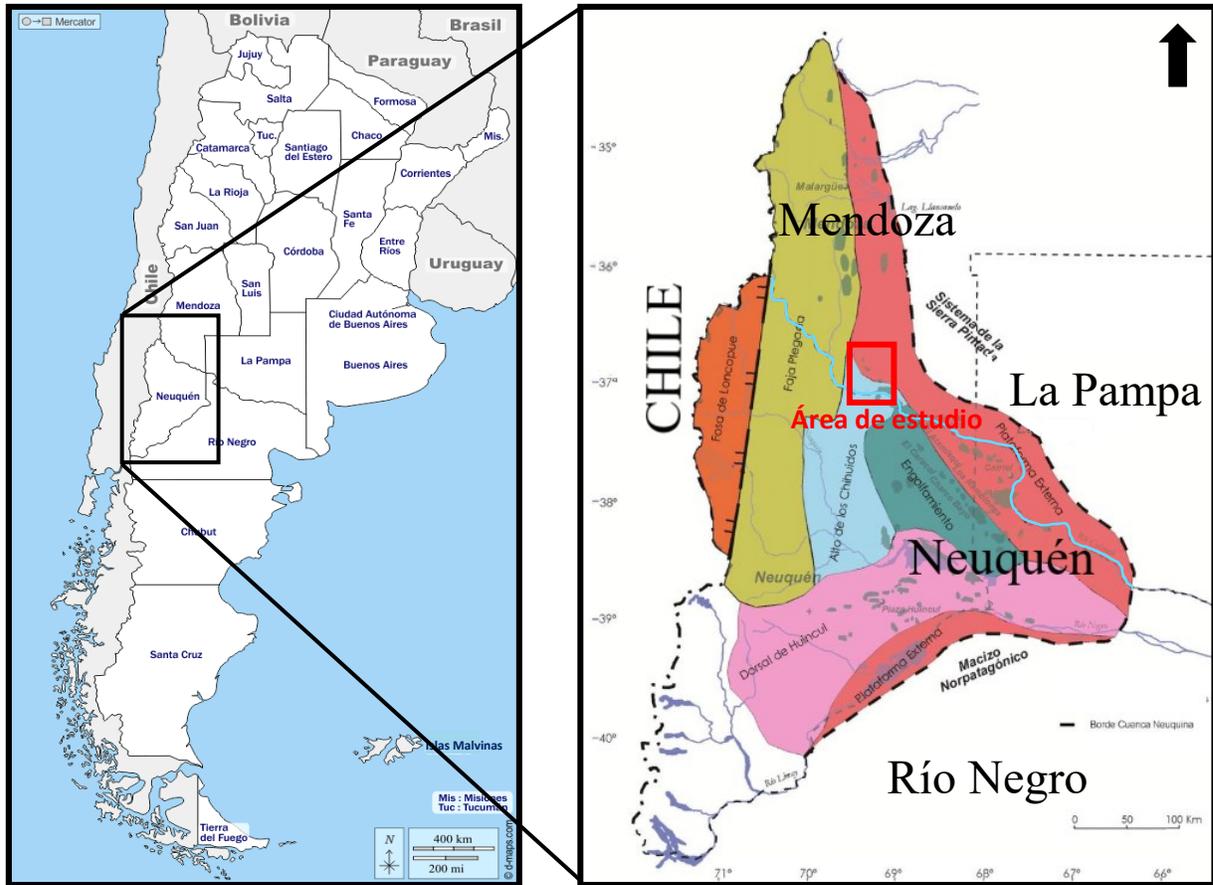


Figura 5. Área de estudio representada en el mapa con un recuadro rojo (modificado de Cáceres, 2018).

ALMACENAMIENTO SUBTERRÁNEO DE GAS

Estos tipos de almacenamientos a comparación de los superficiales (depósitos cilíndricos de alta resistencia construidos con fibra de vidrio, fibra de carbono y aluminio) están protegidos por un recubrimiento de roca de gran espesor, siendo en términos de seguridad una gran ventaja. A su vez, permiten almacenar grandes volúmenes de gas, por lo que la densidad energética es elevada (Moyano Tirado, 2018).

El almacenamiento es una de las dificultades que se manifiestan en el avance de la producción del hidrógeno como fuente energética, por lo que el almacenaje en el subsuelo es el que presenta un mayor aprovechamiento económico y energético debido a que garantizan grandes volúmenes

almacenados. A nivel mundial se han estudiado cuatro tipos de almacenamientos posible (Fig. 6), como los reservorios de gas/petróleo depletados, acuíferos, cavidades mineras y cavernas de sal (Lord *et al.*, 2011), siendo este último, el que se pretende abordar en el presente trabajo final. Una de las principales ventajas que presentan las cavernas de sal por sobre los yacimientos de petróleo/gas depletados como almacenamiento de gas es la alta capacidad sellante de las sales y su cualidad inerte. Otra ventaja respecto a los otros tipos de almacenamiento de gas es su flexibilidad en el caudal de despacho de gas (Tabla 2).

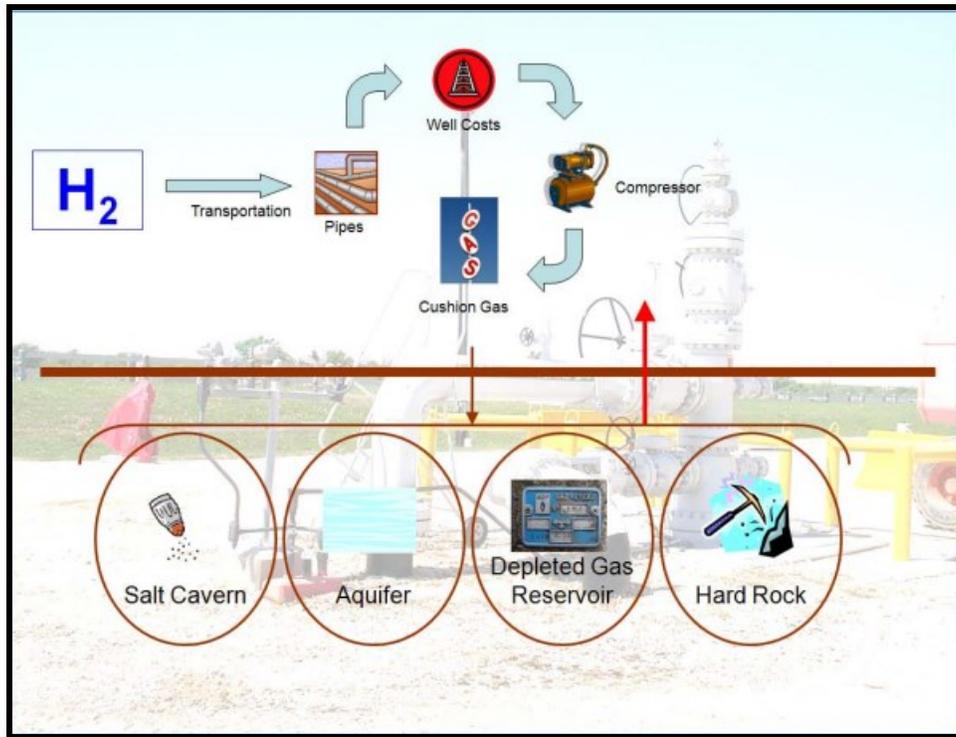


Figura 6. Modelos de almacenaje de hidrógeno (Lord *et al.*, 2011).

Tabla 2. Tipos de almacenamientos geológicos y sus principales características (modificado de Moyano Tirado, 2018).

Tipo	Descripción	Operación principal	Ventajas	Desventajas
Cavernas de sal	Caverna creada por la disolución de sal.	El gas se encuentra comprimido en la caverna.	Gran volumen geométrico. Altas presiones de almacenamiento. Estabilidad a largo plazo. Alta capacidad de entrega. Alta flexibilidad y versatilidad.	Restricciones medioambientales. Debe respetarse una presión mínima.
Acuíferos	Formación rocosa porosa y permeable de depósito.	El agua es desplazada por el gas inyectado.	Alta capacidad.	Exploración. Deshidratación. Restricciones medioambientales.
Yacimientos depletados	Formación rocosa porosa y permeable de depósito.	Los fluidos nativos son desplazados y comprimidos por el gas inyectado.	Reutilización de instalaciones. Previamente explorado.	Mezcla del gas inyectado y fluidos. Tratamiento del gas.
Cavidades mineras	Mina abandonada o excavada.	El gas se encuentra comprimido en la cavidad.	Alta capacidad de entrega. Alta flexibilidad y versatilidad.	Escasez de emplazamientos. Riesgos altos.

Almacenamiento en cavernas de sal

Estas cavernas son cavidades generadas artificialmente en depósitos salinos y permiten almacenar hidrocarburos líquidos y gases a alta presión. En comparación con los yacimientos depletados y los acuíferos, las cavernas de sal permiten altas tasas de inyección y extracción, una alta velocidad de entrega de gas y una mayor seguridad geológica. Una desventaja respecto a los almacenamientos en medios porosos es que a pesar de que las cavernas de sal permiten un gran caudal de extracción del gas, el volumen almacenado es menor. Ejemplos de almacenamiento con éxito de hidrógeno en cavernas de sal son Alemania (300 cavernas) y Estados Unidos (200 cavernas) (Costa, 2018). El primer almacenamiento de gas en cavernas de sal fue en Marysville, Michigan en E.E.U.U en el año 1961. Por ejemplo, la planta de McIntosh en Alabama, con 110 MW de potencia, en funcionamiento desde 1991, tiene como medio de almacenamiento una caverna con un volumen de 560.000 m³ con un costo de construcción de 51 millones de dólares (MUSD) con una facilidad de iniciar el funcionamiento en 14 minutos y capacidad para producir energía para 110.000 viviendas (Ávila, 2014).

Además de su capacidad inerte ante la alta reactividad del H₂ la halita posee propiedades que la hacen apta para almacenar gas. Su propiedad viscosa-plástica genera hermeticidad ante la tensión de compresión, debido a que redistribuye la tensión acumulada durante la construcción y operación de las cavernas, lo que permite construir y operar cavernas con diámetros de hasta 100m. Su alto potencial de solubilidad en agua posibilita su construcción mediante lixiviación (Moyano Tirado, 2018).

Depósitos de sal

Los depósitos de sal se dividen en domos salinos (Fig. 7) y en estratos salinos (Fig. 8). Los domos salinos representan formaciones espesas de gran diámetro y profundidad, los cuales se forman por el flujo ascendente de la sal a través de fracturas como consecuencia de la sobrepresión de esta cuando se encuentra sepultada por debajo de otros sedimentos.



Figura 7. Evolución de un diapiro salino (SLB, 2024)

Por otro lado, los estratos salinos, como es el caso del Mb. Troncoso Superior de la Fm. Huitrín, son depósitos estratiformes que a menudo subyacen grandes cuencas con espesores menores a 300 m. Estas se forman en cuencas endorreicas con climas áridos a partir de la evaporación de las aguas salinas y la posterior precipitación de las sales.

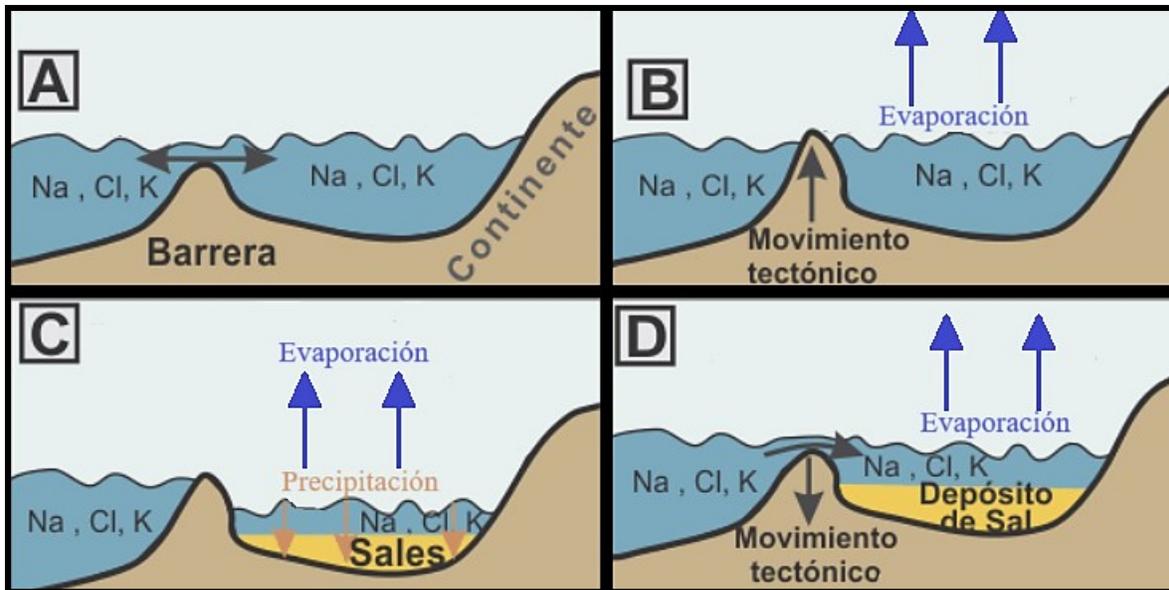


Figura 8. Formación de las capas salinas (Geovirtual2, 2024).

Estos depósitos salinos suelen tener contenidos de anhidrita y arcilla (insolubles) y de sales de potasio, las cuales tienen alta solubilidad. Estas impurezas suelen tener una respuesta negativa en la construcción de las cavernas salinas.

En general, las dimensiones de las cavernas suelen tener 250 m de altura, 70 m de diámetro y suelen estar a profundidades de 1000 m, permitiendo desarrollar geometrías de 500.000 m³ y presiones que van desde los 60 a los 180 bar. La presión máxima debe estar en un rango de 0.7 a 0.8 de la presión litostática, permitiendo prevenir posibles fracturas. Por otro lado, la presión mínima se establece dependiendo de la mecánica de la caverna, por lo que se debe reservar una porción de gas como colchón (Moyano Tirado, 2018).

De acuerdo con Moyano Tirado (2018) se deben tener en cuenta algunas consideraciones para la construcción de cavernas de sal:

Espesor: debe tener un mínimo que establezca los límites potenciales de la caverna, determinando el espesor seguro de techo y fondo del cuerpo salino.

Profundidad del cuerpo salino: en este caso, dos factores importantes aumentan con la profundidad. Por un lado, a mayor profundidad, la presión litostática aumenta, permitiendo almacenar con mayor presión más cantidad de gas. Por otro lado, aumenta la temperatura, por lo que el depósito salino almacén presenta una mayor deformación plástica, de manera que se debe establecer una presión mínima con el fin de mantener la morfología de la caverna. Por lo tanto, se establece una profundidad mínima de formación entre 500 a 2000 m.

Nivel de impurezas: su importancia radica en estimar los costos de construcción, seguridad y determinación del volumen final de la caverna. Esto se debe a que existen rocas que presentan diversos comportamientos ante la deformación y la lixiviación y, por lo tanto, son un problema en términos de construcción y volumetría de la caverna.

Además, hay que considerar las características mecánicas y la permeabilidad de la roca circundante, lo que garantiza el entendimiento sobre las propiedades mecánicas de la sal y prevenir filtraciones.

Es importante el desarrollo de modelos geomecánicos en 3D para evaluar la seguridad de la caverna y optimizar las dimensiones en función de los parámetros mecánicos y geológicos, considerando la presencia de fallas y su influencia en la seguridad de la caverna. Luego se debe realizar una evaluación de seguridad utilizando índices como la deformación, zona plástica, factor de seguridad y presión de filtración (Wang, T., *et al*, 2015).

Caracterización de la caverna

Definir la profundidad, el espesor, la estructura, pureza y propiedades mecánicas de la halita es el primer proceso para realizar, con el fin de definir los límites de presión de operación para mantener la integridad de la caverna. Para su diseño, además de tener en cuenta la información geológica, es importante conocer la geografía del sitio y las propiedades mecánicas y químicas de la halita. Para ello se utilizan datos de pozo con el fin de comprender la compresibilidad, la resistencia a la tracción, la permeabilidad y contenido de impurezas.

La utilización de datos proveniente de sísmica de reflexión tanto 2D como 3D son cruciales para obtener información básica de la geología de la zona (Moyano Tirado, 2018).

Construcción de la caverna

Se construye mediante lixiviación, con un minucioso planeamiento previo y controles que aseguren que la presión contenida en la caverna sea segura. En primer lugar, se realiza una perforación desde la superficie hasta la profundidad requerida. Luego, se bombea el agua a través de una tubería hasta el fondo del pozo con la finalidad de disolver la halita y extraerla mediante otra tubería generando el espacio libre que conforma la caverna (Moyano Tirado, 2018).

Para realizar este proceso son necesarios entre 7 y 9 m³ de agua para generar cada metro cúbico de cavidad, por lo que es indispensable contar con un abastecimiento abundante y barato de agua dulce (Ávila, 2014).

La fase de lixiviación tiene una duración que va de los 2 años y medio a los 4 años, y con el fin de asegurar un desarrollo controlado de las cavernas se utilizan dos procedimientos diferentes:

- Lixiviación directa: se introduce el agua a través de una tubería interna hasta el fondo de la caverna. La salmuera resultante es extraída a través del espacio interno entre el interior del tubo y la cubierta externa como fluido inerte. La morfología resultante presenta un mayor diámetro en la parte inferior (Fig. 9).

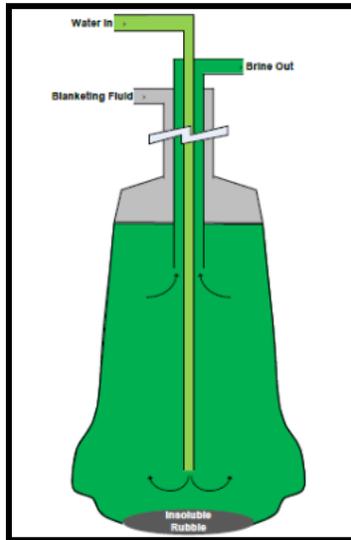


Figura 9. Representación gráfica de la lixiviación directa (tomado de Moyano Tirado, 2018)

- Lixiviación indirecta: se introduce el agua a través del espacio interno entre el interior del tubo hasta el fondo donde se encuentra el punto de recolección de la salmuera. La morfología resultante presenta un mayor diámetro en la parte superior (Fig. 10).

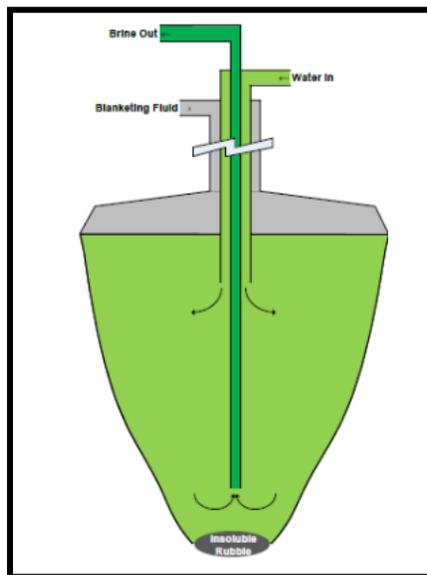


Figura 10. Representación gráfica de la lixiviación indirecta (tomado de Moyano Tirado, 2018).

Para que este proceso sea controlado se utiliza un fluido inerte (*blanket*) de recubrimiento no reactivo a la sal, como el nitrógeno, diésel, gas natural y propano, siendo en todos los casos menos densos que la salmuera, lo que permite proteger al techo de la caverna de una disolución incontrolada (Moyano Tirado, 2018).

La principal dificultad en la formación de la caverna es controlar la disolución de manera que se mantenga la forma y la dimensión deseada. Esto se puede controlar actuando sobre los caudales de disolución, el sentido de la disolución, posición de la interfase salmuera-*blanket* y el nivel de inyección de agua.

La primera fase de la disolución consiste en la generación de un volumen de insolubles que se ubica al fondo de la caverna, lo que genera una reducción en el volumen final de la cavidad. Esta cantidad de insolubles depende directamente del porcentaje de impurezas que tenga el cuerpo salino, estimado a partir de testigos obtenidos en la perforación de la sal (Fig. 11). El control de la forma de la caverna se realiza mediante una sonda sónica que desciende dentro de ella, produciendo un barrido vertical y horizontal de la cavidad. Los datos de salinidad, temperatura y caudal permiten estimar con bastante precisión el volumen creado (Ávila, 2014). Cuando este proceso haya culminado y la estructura de la caverna está consolidada se introduce gas para realizar una prueba inicial de la mecánica y hermeticidad de la caverna y del entubado (Moyano Tirado, 2018).

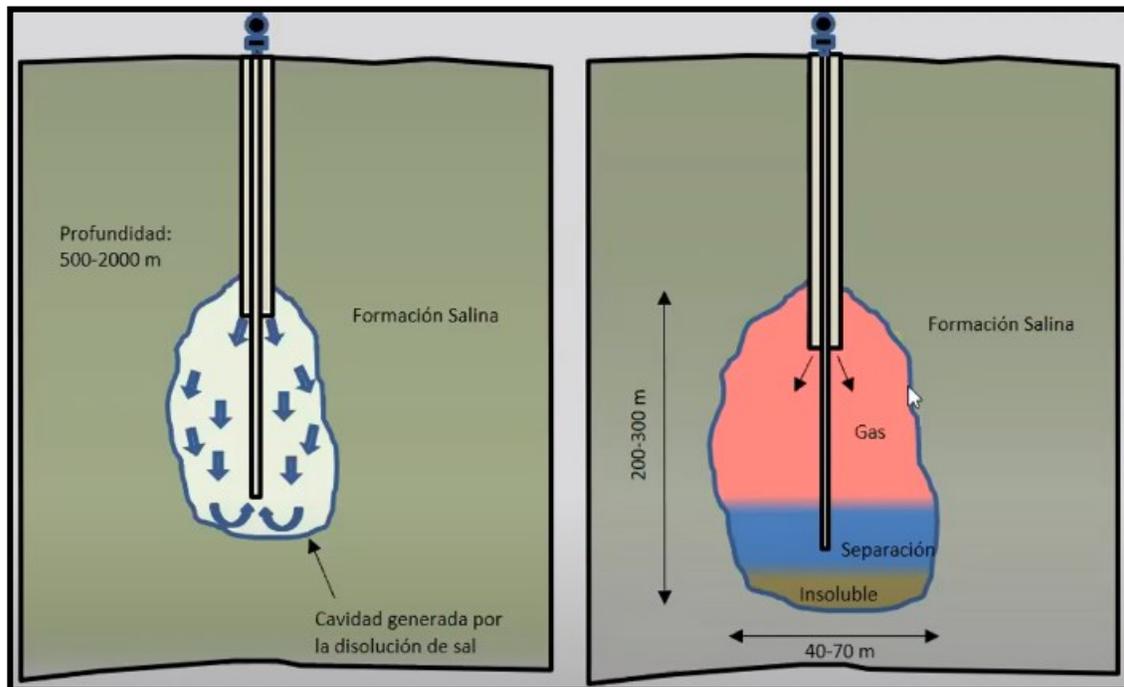


Figura 11. Representación gráfica de la formación de la caverna salina (tomado de MEGSA, 2020).

La salmuera resultante puede ser vendida a industrias que se dediquen a la extracción de sal u otras que lleven a cabo actividades de descalcificación industrial como por ejemplo las industrias petroquímicas (Ávila, 2014).

MARCO GEOLÓGICO

La Cuenca Neuquina registra una columna sedimentaria de más de 6000 m de espesor en su parte central, la cual incluye rocas sedimentarias marinas y continentales con edades que van desde el Triásico Superior a la actualidad.

A fines del Triásico, el sector centro-Oeste de América del Sur estuvo sometido a esfuerzos extensionales producto del desmembramiento del supercontinente Pangea, lo que provocó una deformación en hemigrábenes con un rumbo Noroeste. Posteriormente, en el Jurásico Inferior se restableció un régimen tectónico compresivo, producto de una nueva etapa de subducción,

generando así un arco magmático con cuencas de intraarco y retroarco, caracterizadas por rellenos sedimentarios principalmente marinos.

La Cuenca Neuquina se comportó como una cuenca de retroarco durante el Jurásico Medio hasta el Cretácico Inferior (Fig. 12A), cuando el levantamiento de la Cordillera de los Andes y la formación de la faja plegada y corrida del agrio, provocaron que el comportamiento de la cuenca se transforme al de una cuenca de antepaís (Casadío, 2015).

Se registraron 6 transgresiones marinas provenientes del Océano Pacífico y una última transgresión proveniente del Océano Atlántico, asociada a una interrupción en la comunicación con el Océano Pacífico y al cambio de pendiente regional hacia el Este (Fig. 12B).

Por último, durante el Mioceno, se reactivó la faja plegada y corrida, culminando así la estructuración de la cuenca (Casadío, 2015).

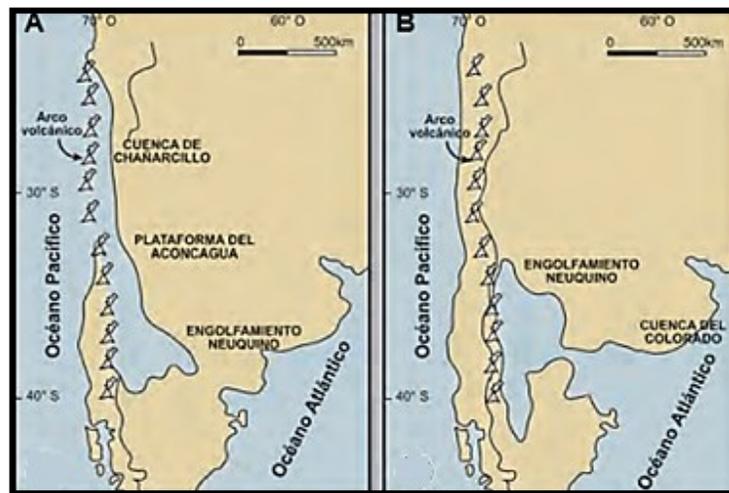


Figura 12. A) Ubicación y extensión del engolfamiento Neuquino y la ubicación del arco volcánico durante el Cretácico Inferior. B) Ubicación y extensión del engolfamiento Neuquino, su conexión con la cuenca del Colorado y la ubicación del arco volcánico durante el Cretácico Superior (Casadío, 2015).

Estratigrafía

La estratigrafía de la Cuenca Neuquina puede describirse en tres etapas según Casadío (2015), las cuales se ven representadas en el esquema de la Figura 13 y se describen a continuación:

Etapa de sin-rift (Triásico Superior-Jurásico Inferior)

Sobre el basamento integrado por metamorfitas de bajo grado silúricas y devónicas, plutonitas y vulcanitas carboníferas-triásicas del Gr. Choiyoi yacen rocas volcánicas y epiclásticas del Triásico Superior-Jurásico Inferior desarrolladas en una etapa de sin-rift, denominadas como los depósitos del ciclo Precuyano. Muravchik *et al.* (2011) describe esta unidad como un escenario paleoambiental complejo con sucesiones de flujos lávicos, intrusivos someros, depósitos piroclásticos y depósitos aluviales y lacustres, representados por las formaciones Cordillera del Viento y Milla Michicó.

Etapa de post-rift (Jurásico Inferior-Cretácico Inferior)

El comienzo de la subducción en el margen occidental de Gondwana en el Jurásico Inferior y Medio desarrolló en el Jurásico Superior el arco magmático. En este escenario de subsidencia, se generaron las transgresiones marinas provenientes del proto Océano Pacífico a través de aperturas en dicho arco que permitieron la comunicación con el océano. En este contexto, la subsidencia térmica y la extensión detrás del arco generaron las condiciones ideales para la depositación de potentes sucesiones sedimentarias asociadas a cambios notorios en el nivel del mar, y a la tasa de aporte sedimentario.

Esta etapa es dividida, de acuerdo con Groeber (1946) y Groeber *et al.* (1953), por discordancias regionales en dos ciclos sedimentarios separados, el Ciclo Jurásico y el Ciclo Ándico.

Ciclo Jurásico

Incluye depósitos de edades desde el Hetangiano al Oxfordiano superior inclusive y posee dos subciclos, 1) Cuyano y 2) Loteniano-Chacayano.

- 1) Este subciclo comienza con la transgresión sobre los depósitos precuyanos (Arregui *et al.* 2011a). Abarca todos los depósitos entre el Hetangiano y el Caloviano medio y está representado por la Fm. Los Molles, Fm. Lajas, Fm. Punta Rosada y Fm. Challacó. Estas formaciones se encuentran cubiertas por depósitos evaporíticos de la Fm. Tábanos.
- 2) Se deposita con posterioridad a una reactivación tectónica y en contacto discordante, con una edad entre el Calloviano medio y el Oxfordiano superior (Arregui *et al.* 2011b). Está representado por las formaciones Lotena, Barda Negra, La Manga y Auquilco.

Ciclo Ándico

Se desarrolló durante el Kimmeridgiano y el Albiano, luego de un gran alzamiento y migración del arco volcánico, que produjo una interrupción en la comunicación con el Océano Pacífico, favoreciendo una sedimentación de origen continental, representado por la Fm. Tordillo, la cual culmina de manera abrupta en el Titoniano temprano debido a una inundación marina de gran extensión, por lo que se generaron depósitos pelíticos con gran contenido de materia orgánica. Las formaciones Tordillo y Vaca Muerta constituyen la base del Gr. Mendoza. Durante el Titoniano se genera la mayor expansión del mar, hasta el Valanginiano temprano, cuando se produjo un descenso del nivel del mar, representado por la Fm. Mulichinco con facies clásticas continentales, transicionales y marinas. Por encima, se deposita la Fm. Agrío y Fm. Centenario, representadas por facies marinas. Este ciclo culmina con los depósitos continentales, marinos someros y evaporitas del Barreminiano-Aptiano de la Fm. Huitrín y Rayoso, de edad Aptiano-Albiano (Casadío, 2015).

Etapa de compresión y cuenca de foreland (Cretácico Superior-Cenozoico)

Esta etapa se inicia con la compresión continua asociada a cambios en la orientación de la convergencia y velocidad de subducción de la placa oceánica (Cobbold y Rossello, 2003). Está representada por un amplio desarrollo de depósitos continentales en discordancia, dentro del Gr. Neuquén, que contiene restos fósiles de dinosaurios conocidos a nivel mundial, lo que denota la evolución de la cuenca a un estadio de antepaís (*foreland*). Suprayacente a estos depósitos se desarrollan los correspondientes al Gr. Malargüe, los cuales representan la primera transgresión marina desde el Océano Atlántico. Por último, en el Cretácico Superior se produjo una nueva fase de deformación, la cual reactivó zonas de debilidad preexistentes variando la morfología general de la cuenca.

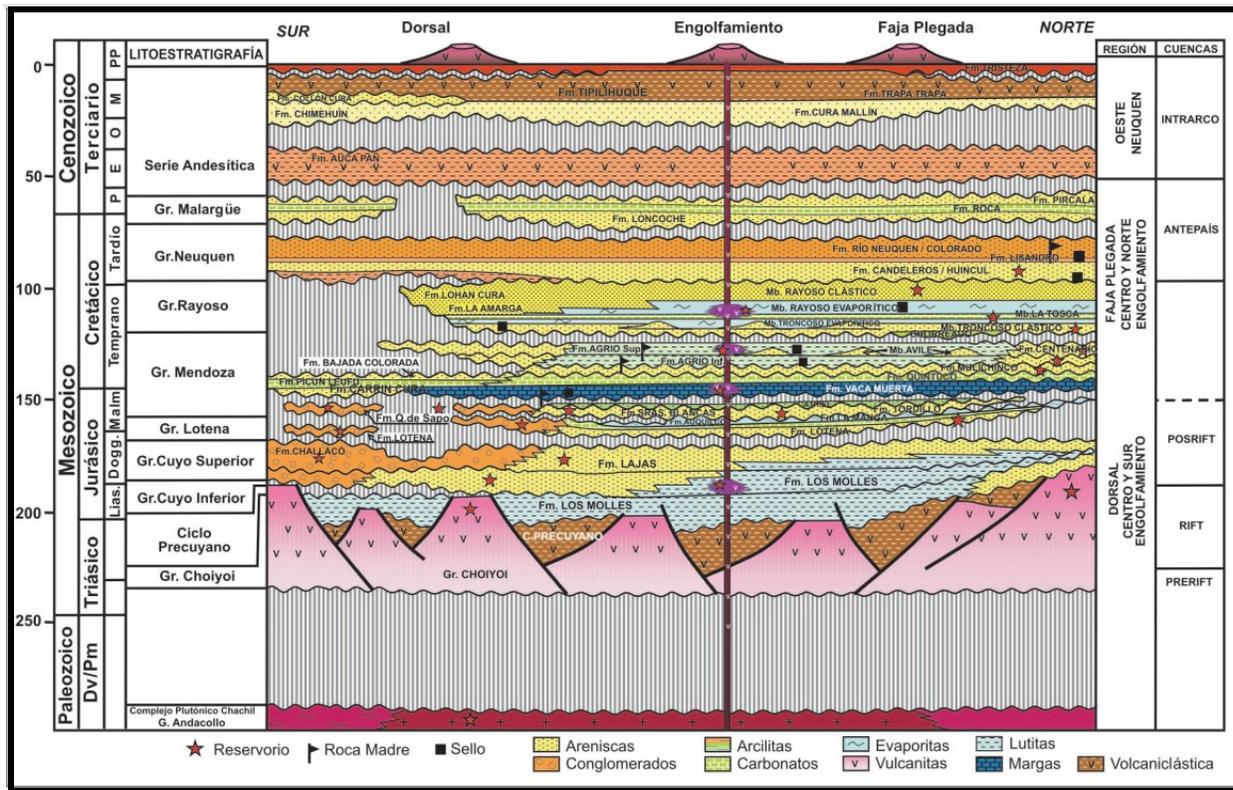


Figura 13. Cuadro estratigráfico de la cuenca Neuquina con las principales unidades litológicas, discontinuidades y los elementos de los sistemas petroleros (Vergani *et al.*, 2011).

Estructura

A lo largo de todos Los Andes existen estructuras compresivas que combinan entre piel fina y piel gruesa generadas por la subducción y las dinámicas de las placas en el margen occidental de Sudamérica. La contracción en el trasarco del sector Sur de Los Andes centrales (entre los 33° y los 40° S) generaron fajas plegadas y corridas de orientación N-S entre los que involucran el basamento y a la sucesión sedimentaria Mesozoica de la Cuenca Neuquina (Turienzo *et al.*, 2020). Esta cuenca fue generada en un ambiente extensivo en el Triásico Tardío, en el que se generaron hemigrábenes controlados por fallas normales de orientación dominante NO-SE (Vergani *et al.*

1995, Cristallini *et al.* 2009) rellenos por sedimentos principalmente volcánoclasticos y continentales del Ciclo Precuyano (Gulisano 1981, Franzese y Spalletti 2001 y Veiga *et al.* 2011). Durante el Jurásico Temprano se comienza a configurar una cuenca de retroarco, con una sedimentación vinculada a ciclos transgresivos-regresivos. En la región de la Dorsal de Huincul se han reconocido que la sección basal del Gr. Cuyo presenta variaciones de espesor, producto de un control estructural dominado por fallas normales activas de una etapa de rift.

Durante gran parte del Cretácico Tardío se depositaron los sedimentos continentales del Gr. Neuquén, vinculados a una etapa de antepaís, producto del levantamiento de la Cordillera de los Andes.

En el Norte neuquino existen estructuras compresivas de piel fina y de piel gruesa de diversas escalas, de las cuales prevalecen las de orientación N-S a NW-SE que constituyen la faja plegada y corrida en el Norte de la provincia. Esta región incluye la faja plegada y corrida de Chos Malal y la faja plegada y corrida del Agrio, las cuales se encuentran separadas geográficamente por el Río Neuquén y donde se infirió la continuación del Lineamiento de Cortaderas por Ramos y Kay (2006) (Fig. 14). El estilo estructural en el sector Norte de la faja plegada y corrida del Neuquén está controlado por estructuras de orientación N-S y vergencias hacia el Este y anticlinales que involucran el basamento (Fig. 15A) (Turienzo *et al.* 2020).

La faja plegada y corrida de Chos Malal presenta estructuras de piel gruesa tal como el anticlinal de la Cordillera del Viento, que es uno de los más significativos de Los Andes neuquinos ya que forma una cordillera de 15 km de ancho y 65 km de longitud que expone rocas de basamento. Estas estructuras tienen una vergencia general hacia el este, incluidas las de piel fina en el sector Oeste mientras que, en el este, estas estructuras de piel fina tienen una vergencia predominante hacia el Oeste (Fig. 15B) (Turienzo *et al.* 2020).

La faja plegada y corrida del Agrio se encuentra en el sector centro-Oeste de Neuquén. Esta gran estructura exhuma secuencias sedimentarias marinas y continentales triásicas y cretácicas del relleno de la Cuenca Neuquina en un ambiente de retroarco, las cuales sufrieron la deformación desde el Cretácico Tardío hasta la actualidad. Presenta estructuras de piel fina y piel gruesa con una vergencia general hacia el Este (Fig. 15C) (Turienzo *et al.* 2020).

Ha sido dividida en una zona interna, con una deformación de gran escala afectando al basamento y una zona externa con una deformación que afecta la cobertura sedimentaria y una participación subordinada del basamento (Irastorza *et al.*, 2019).

El Lineamiento de Cortaderas está definido por fallas con tendencia al Noroeste. Fue interpretado por como un límite del basamento que fue reactivado durante la deformación andina (Ramos y Folguera, 2005). Por otro lado, Cobbold y Rossello (2003), consideran que el lineamiento de Cortaderas es un sistema de empuje reactivado durante el Paleógeno con vergencia al Norte.

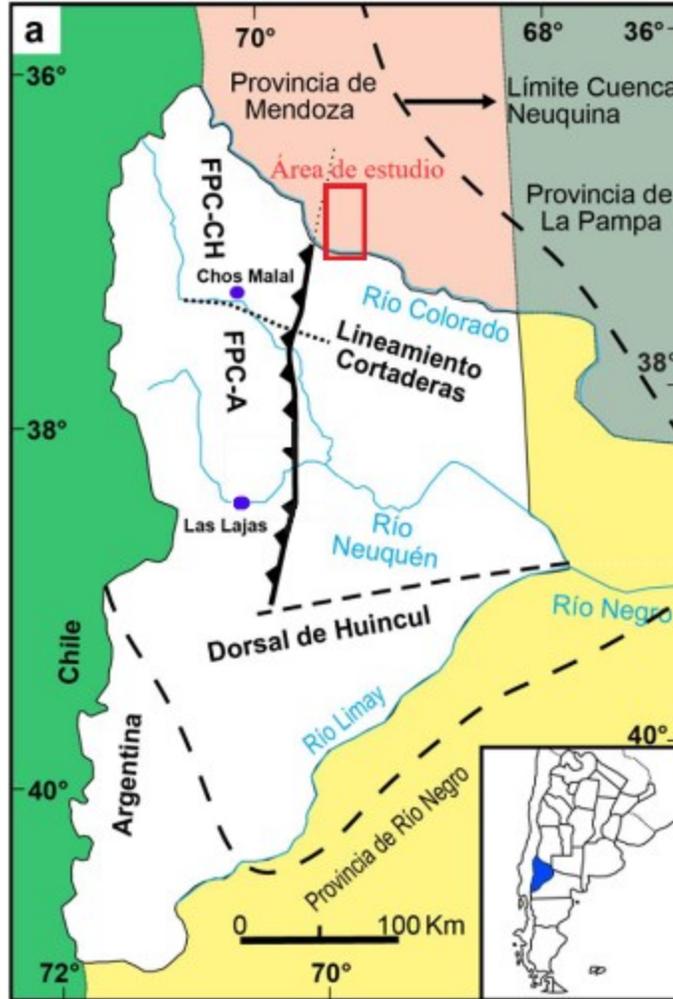


Figura 14. Ubicación regional de las fajas plegadas y corridas en el norte de la Provincia de Neuquén. FPC-CH: Faja plegada y corrida de Chos Malal.; FPC-A: Faja plegada y corrida del Agrio (modificado de Cobbold y Rossello, 2003).

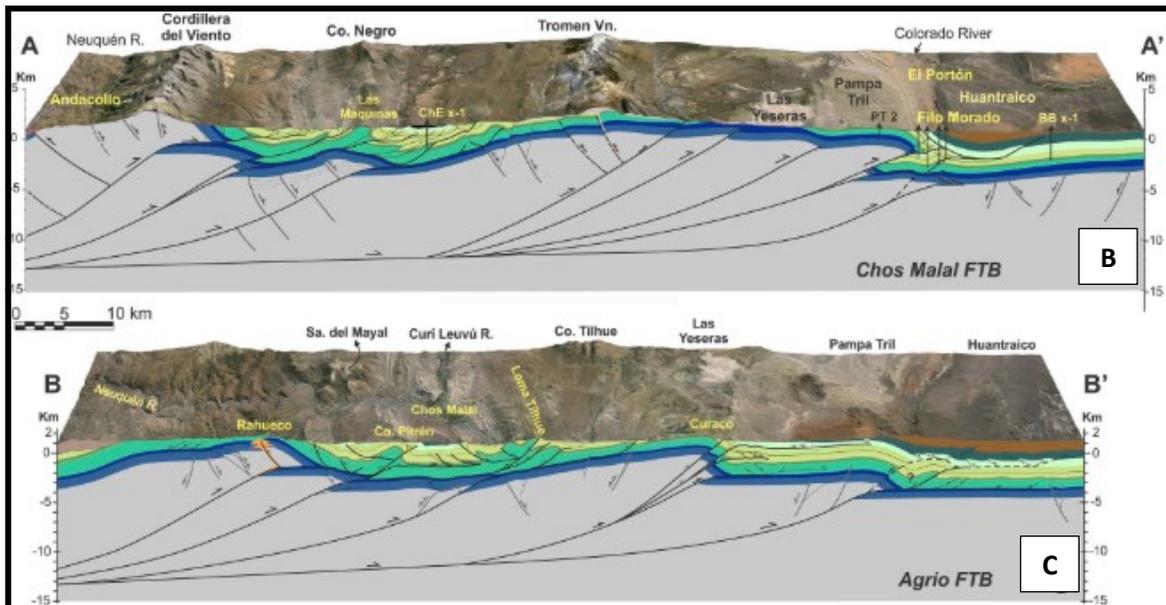
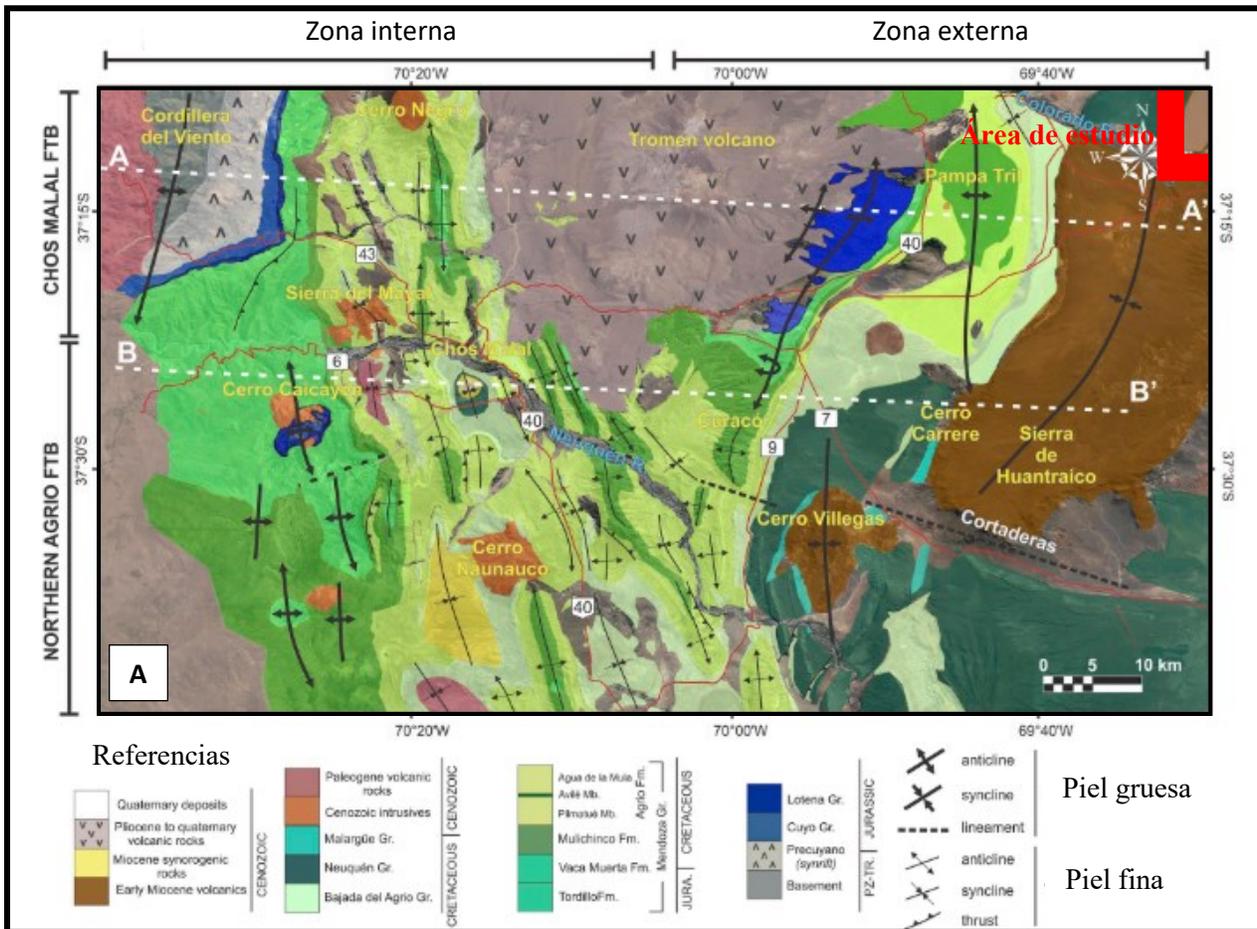


Figura 15. A) Mapa geológico de la faja plegada y corrida al norte de Neuquén. B) Sección estructural regional de la faja plegada y corrida de Chos Malal. C) Sección estructural regional de la faja plegada y corrida del Agrio (modificado de Turienzo *et al.*, 2020).

Regiones Morfoestructurales

Dentro de la cuenca se reconocen 6 regiones morfoestructurales, representadas en la Figura 16:

1) Faja plegada: desarrollada en las proximidades del arco volcánico, se caracteriza por una intensa deformación con desarrollo de amplios anticlinales y sinclinales elongados. Constituyó uno de los principales depocentros de la Cuenca Neuquina, que debido a la compresión exhuma muchos tramos de sucesión sedimentaria.

2) Alto de los Chihuidos: también conocido como Dorso de los Chihuidos, está localizado inmediatamente al este del tramo Norte-Sur del Río Neuquén. Consta de un extenso eje anticlinal de gran radio de curvatura de unos 70 km de largo y unos 15 a 20 km de ancho.

3) Plataforma externa: región en donde se encuentra el área de estudio, presenta una cubierta sedimentaria relativamente delgada, del orden de 2000 m aproximadamente, que disminuye hacia el Noreste, típico borde de cuenca. Estructuralmente es menos complejo que las unidades previamente descritas y se encuentra controlado por el movimiento diferencial de bloques del basamento debido a fallas normales, pliegues de escaso relieve estructural, suaves anticlinales y estructuras con cierre contra falla. Según Legarreta *et al.* (1999), se destacan reactivaciones de estas estructuras a lo largo de la historia geológica, lo que denota un marcado control estructural del registro sedimentario de la zona, lo que provocó una buena conservación desde el punto de vista de los sistemas petroleros.

4) Engolfamiento: delimitada con la Plataforma Nororiental debido a un fuerte acuñamiento de toda la columna sedimentaria y con el Alto de los Chihuidos debido a la existencia de hemigrábenes jurásicos con inversión tectónica. Presenta un registro sedimentario muy completo con un gran espesor, debido a que los procesos erosivos no han afectado en gran medida a los procesos de sedimentación.

5) Dorsal de Huincul: posee una extensión de hasta 200 km. Fue interpretado como una falla de desplazamiento lateral con sentido dextrógiro, en donde coexisten en un mismo régimen rotacional, estructuras compresionales y extensionales.

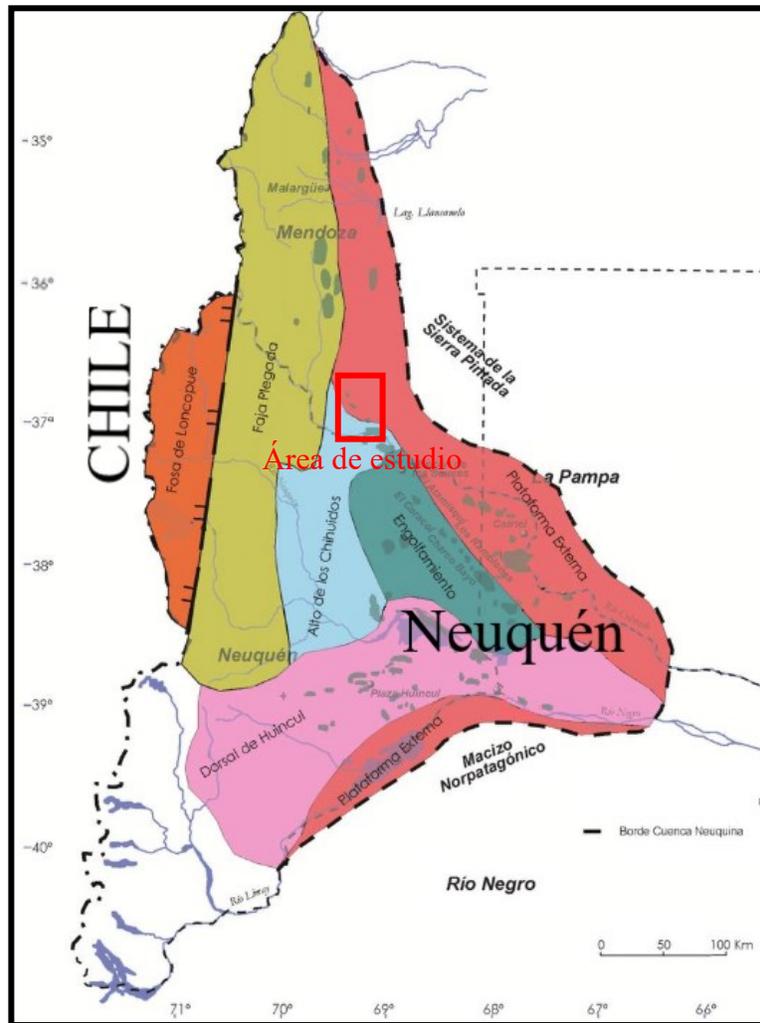


Figura 16. Regiones morfoestructurales de la cuenca neuquina (modificado de Cáceres, 2018).

Modelo sedimentológico Fm. Huitrín

Las condiciones de sedimentación marina sobre amplias plataformas en la Subcuenca del Colorado perduraron hasta fines del Hauteriviano pero en el Barremiano comenzó a haber una retracción de la sedimentación hacia situaciones más internas de la cuenca (Legarreta y Uliana, 1991), donde se desarrolló el Mb. Chorreado de la Fm. Huitrín (Fig. 17A). Bajo este nuevo escenario, las extensas áreas de plataforma permanecieron expuestas a condiciones subaéreas y dentro de la cuenca se acumularon areniscas, calizas y dolomitas en un medio de aguas someras que, hacia posiciones más internas, gradaron a una sección muy delgada de pelitas y margas, mostrando todo el conjunto una topografía deposicional empinada y con quiebre de plataforma bien definido (Legarreta, 1985).

La desconexión entre los mares hipersalinos y el Océano Pacífico en conjunto con un fuerte descenso del nivel de base permitió la acumulación de las evaporitas del Mb. Chorreado Superior (Fig. 17B), desarrolladas en posiciones internas de la cuenca y por debajo del quiebre de plataforma de las secuencias precedentes. El cambio notable se generó a partir del evento de desecación del Aptiano, durante el cual se acumuló el Mb. Troncoso Inferior, constituido por

areniscas y pelitas propios de un sistema fluvial efímero lateralmente conectado con barreales y cuerpos temporarios de agua hipersalina, donde precipitaron evaporitas tales como anhidrita y halita (Fig. 17C). Hacia el interior de la cuenca, en los afloramientos del Norte de Neuquén y en los del Sur de Mendoza, la sección inferior de este miembro muestra una definida variación vertical grano y estratocreciente, con desarrollo de canales fluviales, mientras que en posiciones más distales gradan a capas de areniscas finas interestratificadas entre pelitas con cristales de halita y nódulos de anhidrita.

En las posiciones más deprimidas de la cuenca, la unidad está representada por escasas pelitas que alternan con espesos paquetes de halita y algunas capas de anhidrita, solo observable en los sondeos perforados en Malargüe (Legarreta, 1985) y muy rara vez en superficie. En la sección superior de esta unidad se observa un cambio rotundo en cuanto al tamaño de grano, siendo granodecreciente, vinculado a un ascenso del nivel de base. Este rasgo concuerda con la mayor expansión del área de acumulación y un desplazamiento de facies de tipo retrogradante de este intervalo. Asociado con estos depósitos se ha identificado un conjunto arenoso acumulado en campos de dunas eólicas que cubren las viejas zonas de plataforma de la Fm. Agrio Superior y del Mb. Chorreado Inferior, las cuales habían permanecido expuestas subaéreamente y también aparecen rellenando total o parcialmente los valles dentro de unidades más antiguas, que habían estado activos durante el estadio de nivel de base más bajo.

La tendencia ascendente del nivel de base relativo dio lugar a una nueva inundación de la cuenca, pero con aguas hipersalinas, lo cual da testimonio de una conexión restringida con el Pacífico, lo que mantuvo al mar de trasarco bajo un balance hidrológico negativo. Dentro del cuerpo de agua somera se desarrollaron láminas de carbonatos asociados con tapices algáceos, que alternaron con episodios de mayor salinidad con desarrollo de espesas secciones de sulfatos y cloruros (Fig. 17D). La baja capacidad de erosión de las aguas hipersalinas del Mb. Troncoso Superior (Fig. 17E) permitió que las evaporitas cubrieran y preservaran la geometría original de las dunas eólicas, tal como se los puede observar en el Noroeste del Neuquén (Legarreta, 2002).

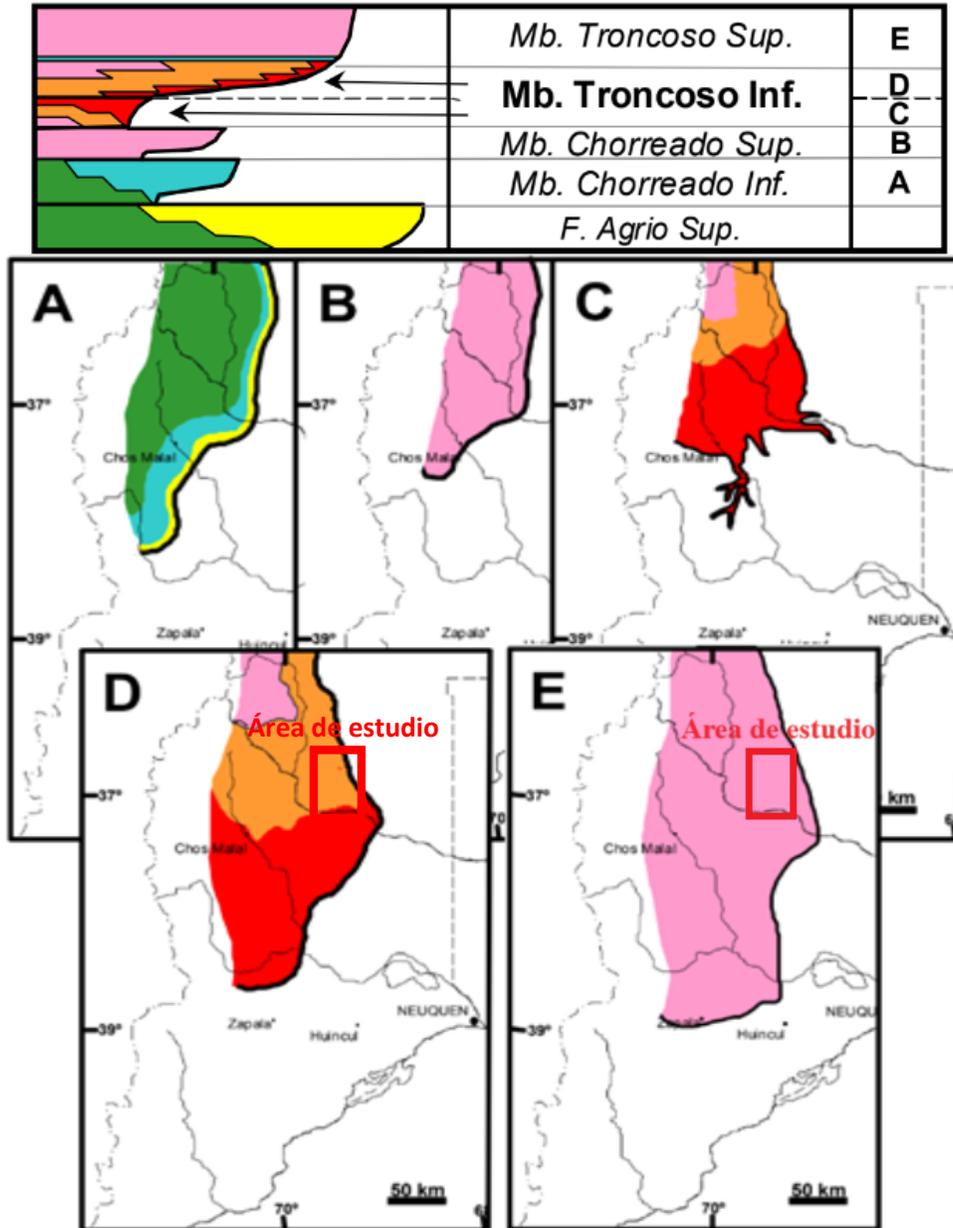


Figura 17. Evolución paleogeográfica durante el Cretácico temprano (modificado de Legarreta, 2002).

La Fm. Huitrín, en la región del cerro La Visera y el arroyo Pichi Neuquén, ha sido dividida en tres miembros: Troncoso (Inferior y Superior), La Tosca y Salina (Fig. 18). El Mb. Troncoso Inferior está compuesto por areniscas fluviales y eólicas, mientras que el Mb. Troncoso Superior está constituido predominantemente por depósitos evaporíticos. El Mb. La Tosca se conforma por calizas y dolomitas con estratificación fina con alternancia de calcáreos con coloración gris amarillenta. El Mb. Salina está compuesto por una sucesión de arcilitas de tonos claros que poseen a menudo bancos de yeso (Leanza, 2003).

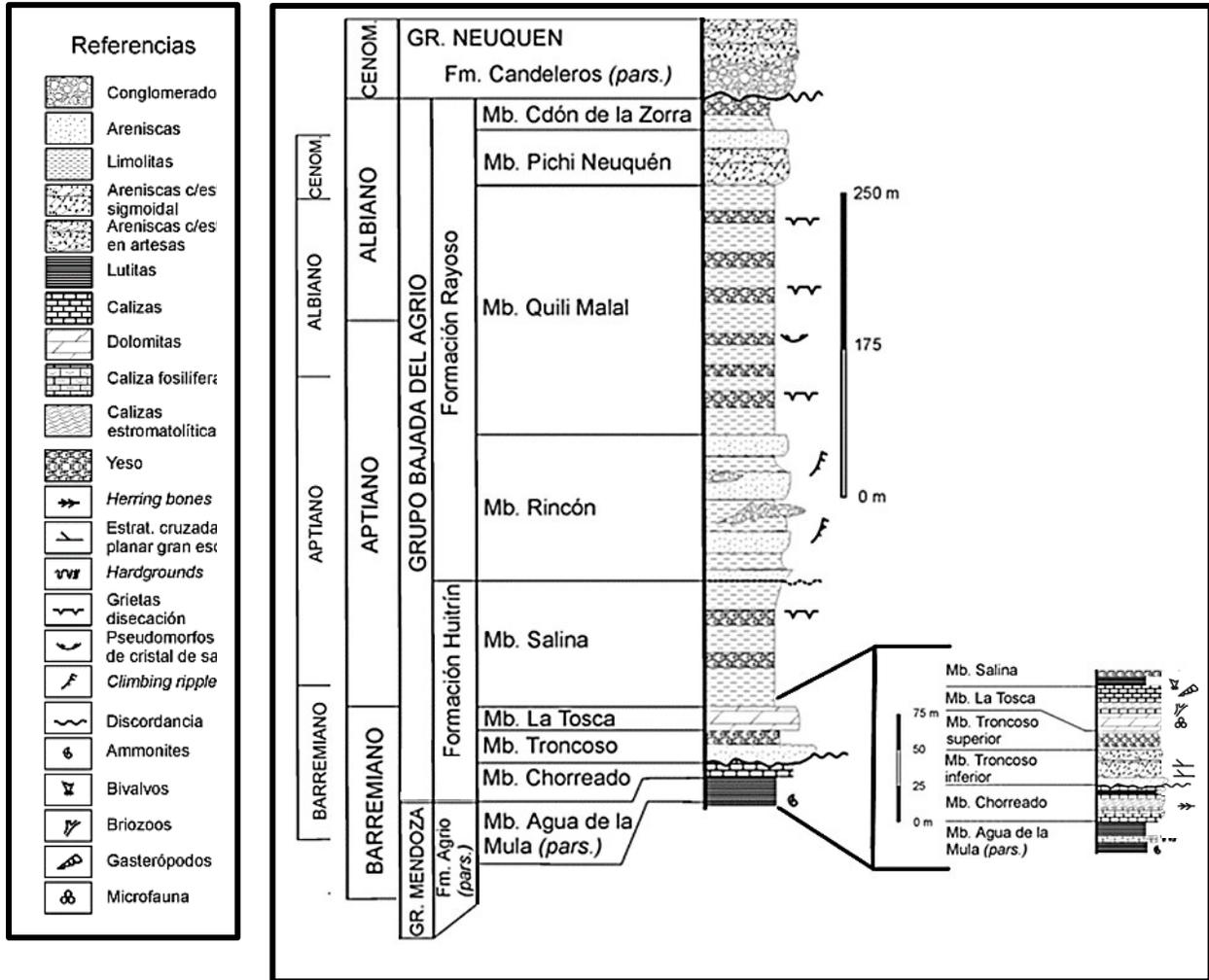


Figura 18. Columna estratigráfica de la comarca de Pichi Neuquén y La Visera (Leanza, 2003).

Miembro Troncoso Superior

El Mb. Troncoso Superior de la Fm. Huitrín, es el miembro de interés para este trabajo, por lo que su descripción se realizará con un mayor nivel de detalle. Posee un amplio desarrollo en gran parte de la Cuenca Neuquina (Fig. 19) con afloramientos que presentan en su sección inferior una predominancia de sulfatos, representados desde la sierra de la Vaca Muerta, al Norte de Zapala, hasta la sierra de la Cara Cura en el Sur de la provincia de Mendoza. En superficie, la sección constituida por cloruros ha sido totalmente lixiviada y el conocimiento de la totalidad de este miembro proviene de perfiles eléctricos y testigos corona obtenidos de las perforaciones orientadas a la exploración y explotación de hidrocarburos, y de las perforaciones específicas para la exploración de sales de Potasio (Gómez Figueroa *et al.*, 2011).

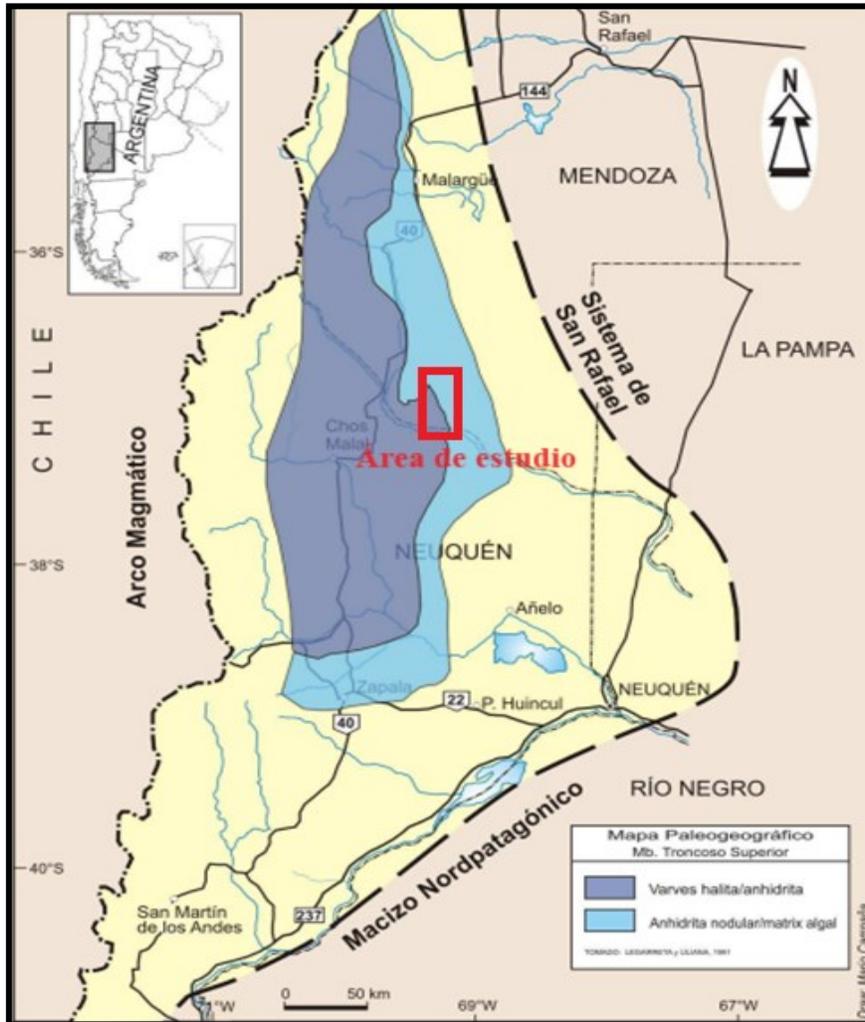


Figura 19. Mapa Paleogeográfico que muestra la disposición de los depósitos de halita y anhidrita y de la anhidrita nodular/matrix algal (modificado de Gómez Figueroa *et al.*, 2011).

Este miembro se encuentra integrado casi en su totalidad por evaporitas entre las que dominan los bancos de halita y anhidrita, intercalados con bancos de silvinita. Hacia el borde oriental de la cuenca y en menor proporción, se desarrollan depósitos de calizas y areniscas. En cuanto a sus límites verticales, es concordante tanto en su piso con el Mb. Troncoso Inferior, como en su techo con el Mb. La Tosca (Fig. 20) (Gómez Figueroa *et al.*, 2011). Estos miembros se depositaron en el Cretácico Temprano.

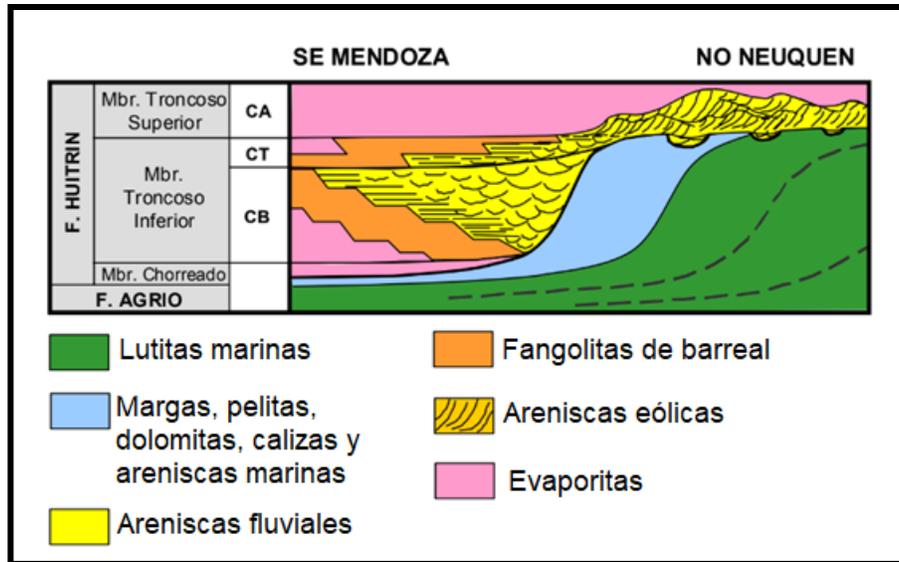


Figura 20. Corte estratigráfico conceptual para los eventos de depositación del Mb. Troncoso Inferior y Troncoso Superior (Cretácico Inferior) basado en perfiles de afloramientos y datos de subsuelo del NO del Neuquén y sur de Mendoza. Los complejos corresponden al CB-nivel bajo, CT-transgresivo y CA-nivel alto (tomado de Legarreta, 2002).

Estos depósitos presentan principalmente formas tabulares con espesores que se mantienen relativamente constantes, siendo el espesor máximo de este miembro ligeramente mayor a los 200 m. El apilamiento tectónico genera que estos espesores varíen al aproximarse a la faja plegada y corrida (Legarreta, 2002).

El Mb. Troncoso Superior representa una etapa de clima muy árido y cálido, el cual genera que el agua salobre contenida en una cuenca endorreica, la Subcuenca del Colorado (Fig. 20), se evapore, generando un aumento en la concentración de sales y provocando la precipitación de las evaporitas. A medida que continuaba la evaporación, comenzaron a precipitar los sulfuros en los sectores más profundos y posteriormente las sales de cloruro, las cuales presentan un amplio predominio en este miembro. Por último, en etapas más avanzadas de desecación, próximos a una desecación casi total, se dio la precipitación de sales de potasio (silvinita). Este no fue un evento aislado, sino que nuevas ingresiones de aguas salobres inundaron la cuenca, restaurando las condiciones de salinidad, deteniendo la precipitación de silvinita y reanudando la precipitación de cloruro de sodio (halita) (Gómez Figueroa, 2011).

La muy buena respuesta de la anhidrita en los perfiles eléctricos de las perforaciones de la Cuenca Neuquina ha permitido delimitar la subcuenca del Colorado, la cual es elongada con orientación N-S y cuya extensión se ve representada en la Figura 21 (Gómez Figueroa, 2011).

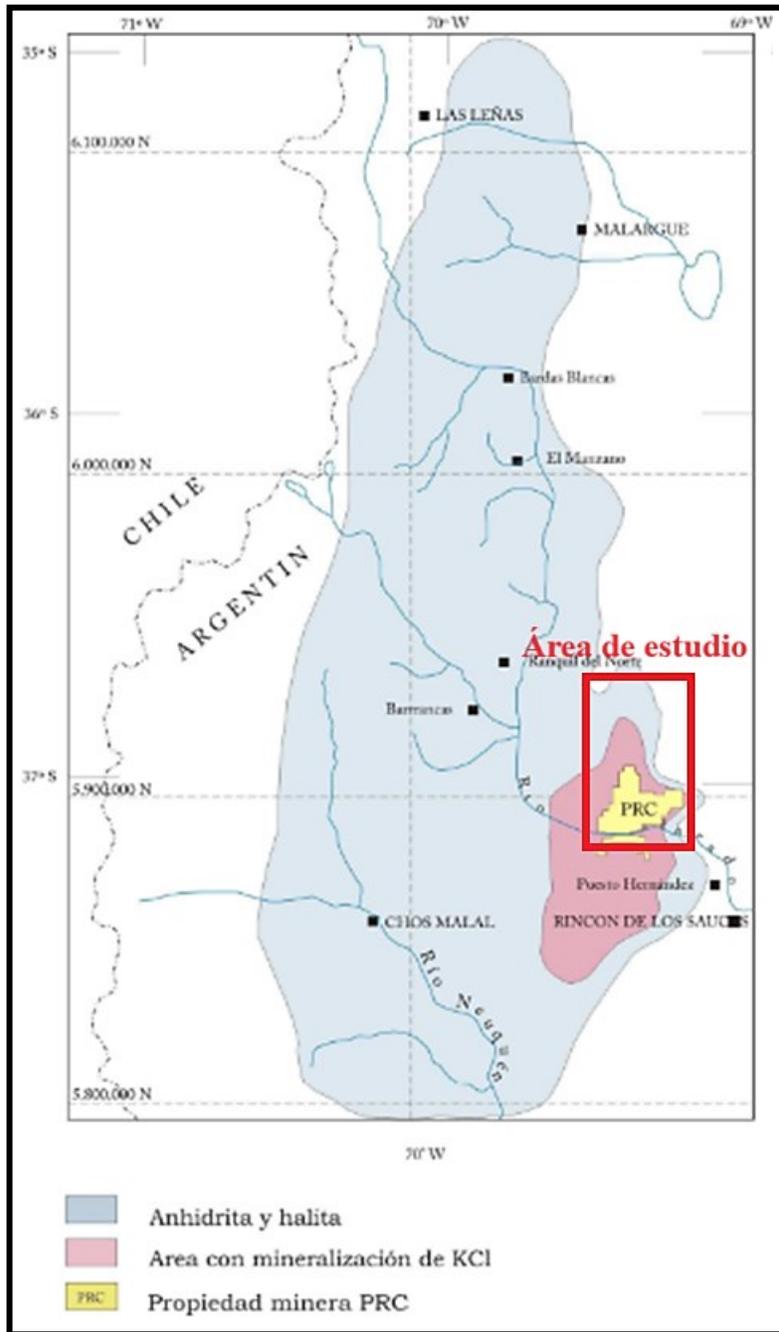


Figura 21. Subcuenca del Colorado (modificado de Gómez Figueroa, 2011).

Además de los depósitos de sales y en menor proporción, se observa la presencia de arcillas que provienen de los altos estructurales ubicados al occidente de la subcuenca del Colorado. Estos depósitos sedimentarios son generalmente finos de muy buena selección, posiblemente acarreados por un medio fluvial de baja energía y depositados principalmente en el centro de la cuenca, donde la columna de agua fue mayor y por lo tanto la energía es menor, lo que permite que los sedimentos finos decanten, siendo los más gruesos los depositados en línea de costa, donde la energía es mayor.

Unidades Litológicas del Mb. Troncoso Superior

A partir de los datos obtenidos mediante registros geofísicos y análisis químicos de la propiedad minera Potasio Río Colorado (representada en amarillo en la Figura 20), se divide al Mb. Troncoso Superior en 6 unidades litológicas de base a techo (Gómez Figueroa *et al.*, 2011):

- 1- Sulfatos Basales (anhidrita)
- 2- Halita Inferior
- 3- Silvinita K1
- 4- Halita Intermedia
- 5- Silvinita K3
- 6- Halita Superior

- 1- Sulfatos Basales: es un cuerpo tabular que constituye la base del Mb. Troncoso Superior con potencias que varían de 7 a 20 m. Estas anhidritas presentan colores grisáceos a blanquecinos, que varían de acuerdo con el contenido de carbonatos y/o halita. Este cuerpo tabular presenta un límite gradual en su base y uno neto en su techo, sobre el que se depositan las evaporitas que constituyen la Sal Principal, definida por Bengochea y Padula (1992) y Balod (1999) (Fig. 22).



Figura 22. Contacto neto entre los Sulfatos Basales (Anhidrita Basal) y la Halita Inferior (Gómez Figueroa *et al.*, 2011).

- 2- Halita Inferior: definida como Sal Inferior por Bengochea y Padula (1992) y Balod (1999), se encuentra en contacto neto planar suprayacente a los Sulfatos Basales con una potencia que varía de 55 a 110 m dependiendo de la posición en la cuenca. Esta unidad, presenta algunas sucesiones de anhidrita y arcillas con espesores de algunos decímetros (Fig. 23).



Figura 23. Texturas de la Halita Inferior (Gómez Figueroa, 2011).

- 3- Silvinita K1: esta unidad se encuentra desarrollada por encima de la Halita Inferior en contacto irregular y transicional y un espesor de hasta 12 m. Está compuesta principalmente por halita y silvinita con participación secundaria de arcilla, anhidrita y hematita (Fig. 24).



Figura 24. Aspecto de la Silvinita K1 (Gómez Figueroa, 2011).

- 4- Halita Intermedia: presenta contactos inferior y superior transicionales con espesores que varían entre 5 y 9 m. Este cuerpo presenta una mineralización con una alta predominancia de halita de aspecto limpio, translúcido y colores blanquecinos con algunos sectores (menos abundantes) de colores anaranjados (Fig. 25). También presenta silvinita en forma de cristales aislados con hematita asociada.

En algunos sectores de la cuenca se encuentran pequeños aglomerados arcillosos, pero en mucha menor proporción y una capa mineralizada de hasta 2 m de potencia de silvinita denominada Silvinita K2.

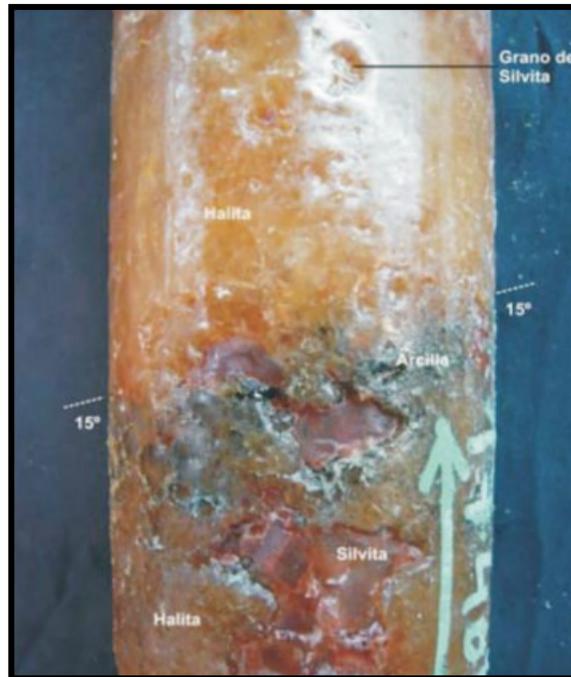


Figura 25. Aspecto de la Halita Intermedia (Gómez Figueroa, 2011).

- 5- Silvinita K3: es el último nivel mineralizado del Mb. Troncoso Superior, teniendo una representación areal muy reducida en comparación con la capa de Silvinita K1. Posee espesores variados, que van desde 1 m hasta 9 m. Su mineralización se compone de halita, silvinita, hematita y arcillas (Ferreira, 2009). Al igual que la unidad Halita Intermedia, tanto su límite inferior como el superior son de carácter transicional. Una de las principales diferencias con la capa Silvinita K1 es que tanto los cristales de silvinita como los de halita son más homogéneos en cuanto a tamaño, alcanzando hasta un par de centímetros (Fig. 26).

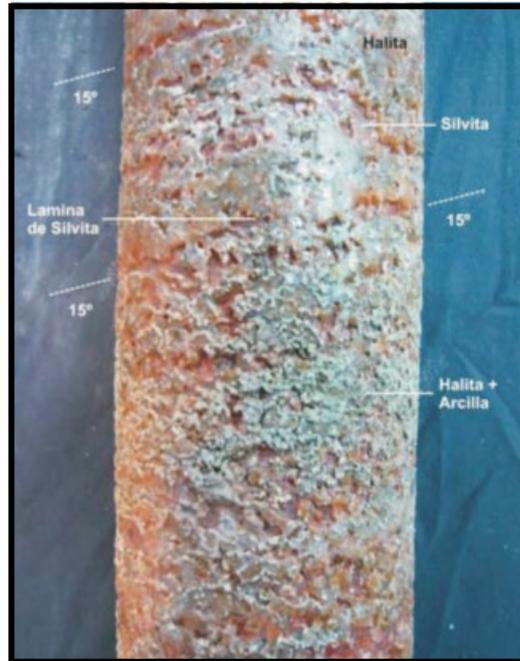


Figura 26. Aspecto de la Silvinita K3 (Gómez Figueroa, 2011).

- 6- Halita Superior: como fue descrito previamente, su contacto inferior con la capa Silvinita K3 es de carácter transicional, pero su techo es de carácter neto irregular. Presenta potencias promedio de hasta 30 m. Esta unidad es la última netamente salina, compuesta principalmente por halita y anhidrita en laminas delgadas (Fig. 27). Estas láminas de anhidrita son importantes debido a que permiten realizar una correlación estratigráfica en distintos puntos de la cuenca. Esta unidad es infrayacente al Mb. La Tosca.

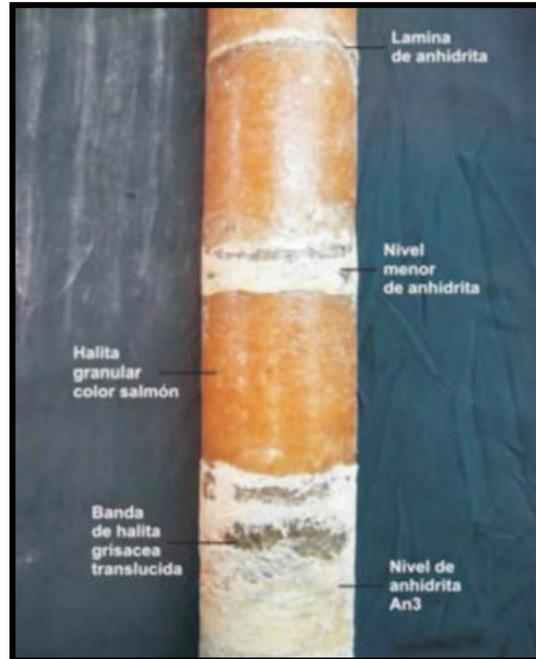


Figura 27. Halita Superior (Gómez Figueroa, 2011).

Paleontología

La naturaleza deposicional de estas unidades no presenta condiciones favorables para la preservación fosilífera. Sin embargo, en los niveles de arcilla verde oscura ubicada en el tramo superior del Mb. Troncoso Superior y la base del Mb. La Tosca y con base en los estudios microflorísticos realizados por Vallati (1995, 2001) y los trabajos realizados por Legarreta (1996), Volkheimer y Salas (1975, 1976), Volkheimer *et al.* (1976) y Leanza (2003), se estimó una edad que se remonta al Barremiano superior-Aptiano (125 Ma aprox.).

DESARROLLO

Luego de la recopilación bibliográfica, se comenzó a trabajar con los datos de pozo, representados en la Figura 28 y con dos volúmenes sísmicos (uno en tiempo y otro en profundidad) que abarcan parte de la zona de estudio. Toda esta información fue brindada por YPF, S.A.

Interpretación de perfiles y correlación de pozos

En primera instancia se realizó una correlación de todos los pozos (65 pozos en total) utilizando perfiles eléctricos tales como *Gamma Ray (GR)*, resistividad, densidad y sónico, lo que permitió conocer y ubicar en profundidad las distintas formaciones y miembros. Luego, se eligieron *cross sections* cuyos pozos presentan un mayor espesor del Mb. Troncoso Superior, representadas en la Figura 28.

Ubicación de los Pozos y las Cross Sections en el Área de Estudio

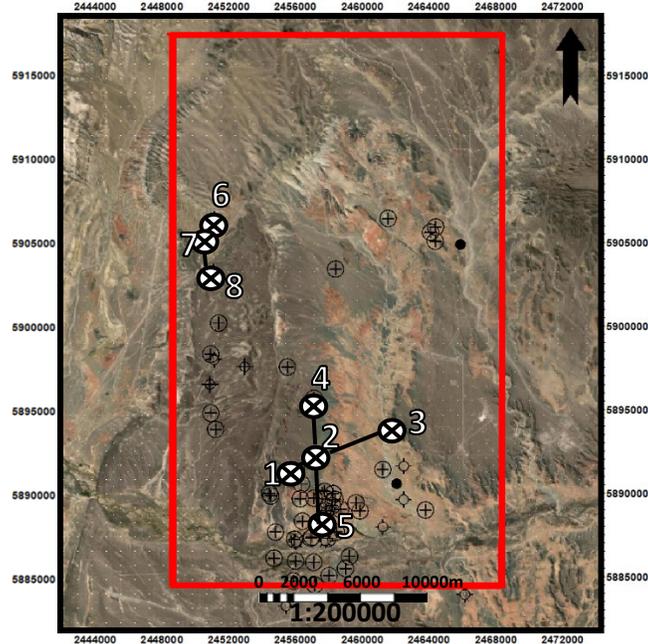


Figura 28. Ubicación de los pozos y las *cross sections* dentro del área de estudio

Para distinguir y discriminar las formaciones o miembros con los datos de pozo es sumamente necesario conocer la litología, espesores y las respuestas que tiene cada tipo de roca a cada indicador. Por ejemplo, los valores de *GR* en la halita son bajos, mientras que en la silvinita son altos. El contenido de arcilla (ricas en K) también presenta altos valores en el *GR* pero no tan significativos como los de la silvinita.

Teniendo en cuenta esto, se determinaron los miembros dentro de la Fm. Huitrín de la siguiente forma:

1) Mb. Troncoso Inferior: está constituido por areniscas y algunas capas menores de granulometría arcillosa, por lo que los valores de densidad van a ser medios y los de *GR* de medios a altos.

2) Mb. Troncoso Superior: presenta en su base anhidrita y luego una gran columna de halita. Además, en etapas de desecación extrema se generaron capas delgadas de silvinita y algunas arcillas fluviales. En este caso la anhidrita presenta valores de *GR* y de densidad levemente menores a los de la halita y la silvinita presenta grandes saltos en radioactividad.

3) Mb. La Tosca: está constituido por dolomitas y pelitas. Esto arroja resultados radioactivos mayores al Mb. Troncoso Superior y valores de densidad variables.

Como se puede observar en las figuras 30 y 31, en estos pozos se pudo determinar el espesor total del Mb. Troncoso Superior, el que posee un límite neto con el Mb. Troncoso Inferior teniendo en su base una capa de poco espesor de anhidrita (generalmente de unos 15 m, pero en algunas ocasiones posee escasa potencia) y como tope al Mb. La Tosca, el que contiene mayoritariamente calizas. A su vez, se determinó contenido de silvinita, que, al ser una sal de potasio (elemento radioactivo), los valores de *GR* son de hasta 200 gAPI.

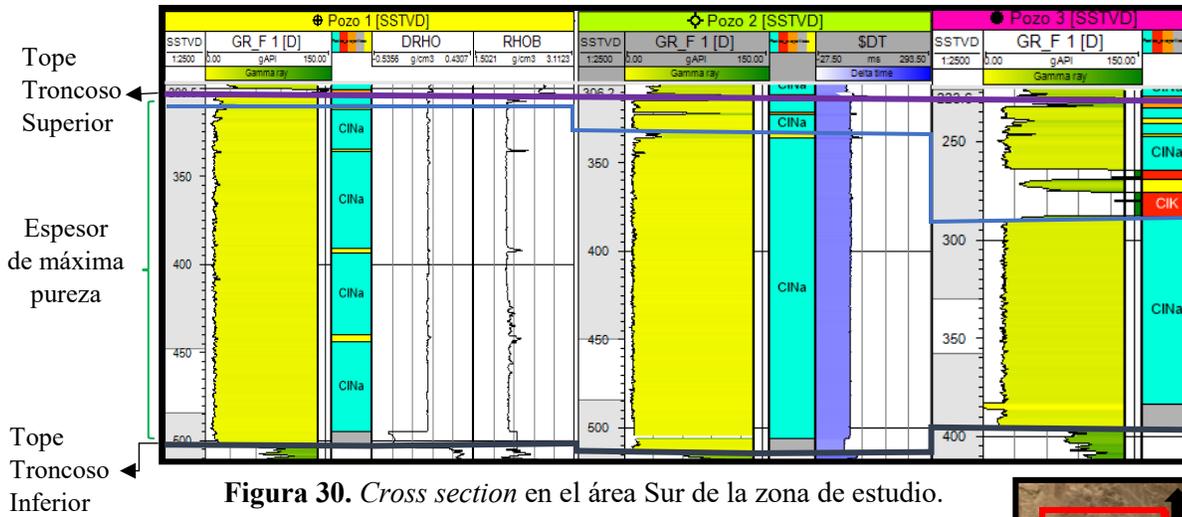


Figura 30. Cross section en el área Sur de la zona de estudio.

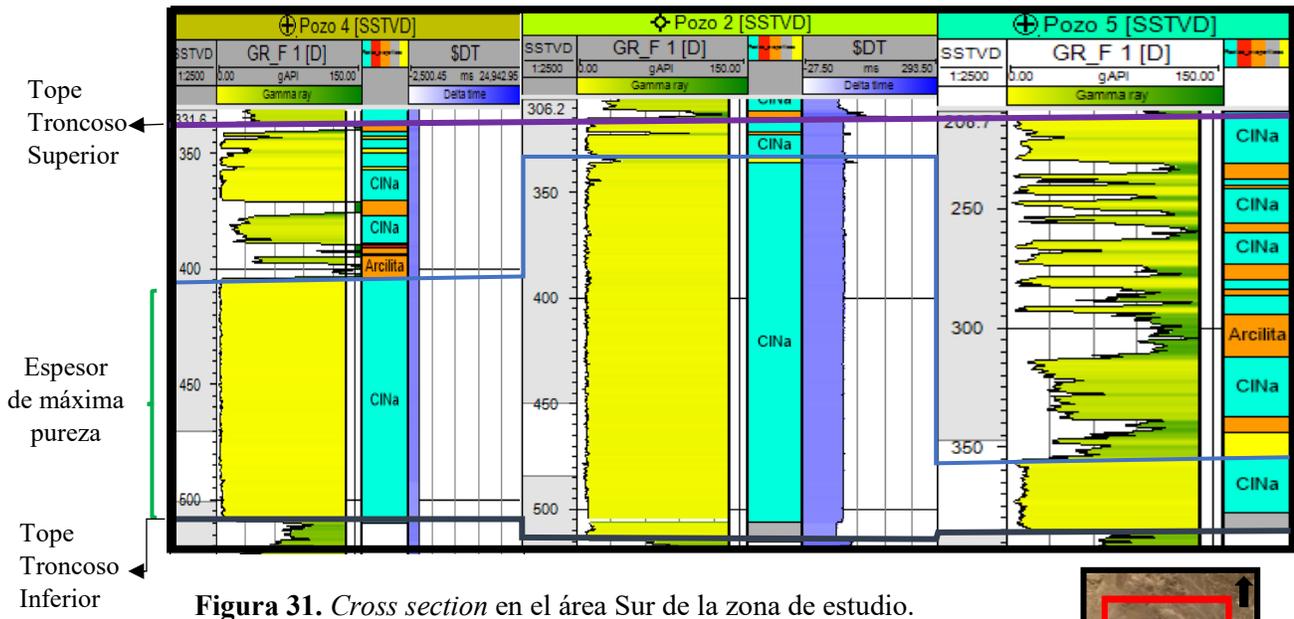


Figura 31. Cross section en el área Sur de la zona de estudio.

El análisis de los registros de pozos muestra un marcado aumento de espesor en el área que circunda al pozo 6 en el sector Noroeste y al pozo 2 en el sector Sur del área de estudio, con una potencia total del Mb. Troncoso Superior de hasta 215 m, aunque presenta una discontinuidad producto del desarrollo de silvinita y arenas (representada en color rojo y amarillo respectivamente en la Figura 32).

En los pozos 7 y 8 se puede apreciar un menor espesor total del Mb. Troncoso Superior que, aunque el pozo 8 muestra una potencia total del miembro levemente inferior al pozo 6, es importante notar que la Anhidrita Basal cuenta con mayor representación y que el intervalo de máxima pureza es menos potente, lo que reduce el objetivo del trabajo al área que rodea al pozo 6.

La Anhidrita Basal se encuentra bien representada, aunque el espesor continúa siendo variable, con un promedio de 15 m.

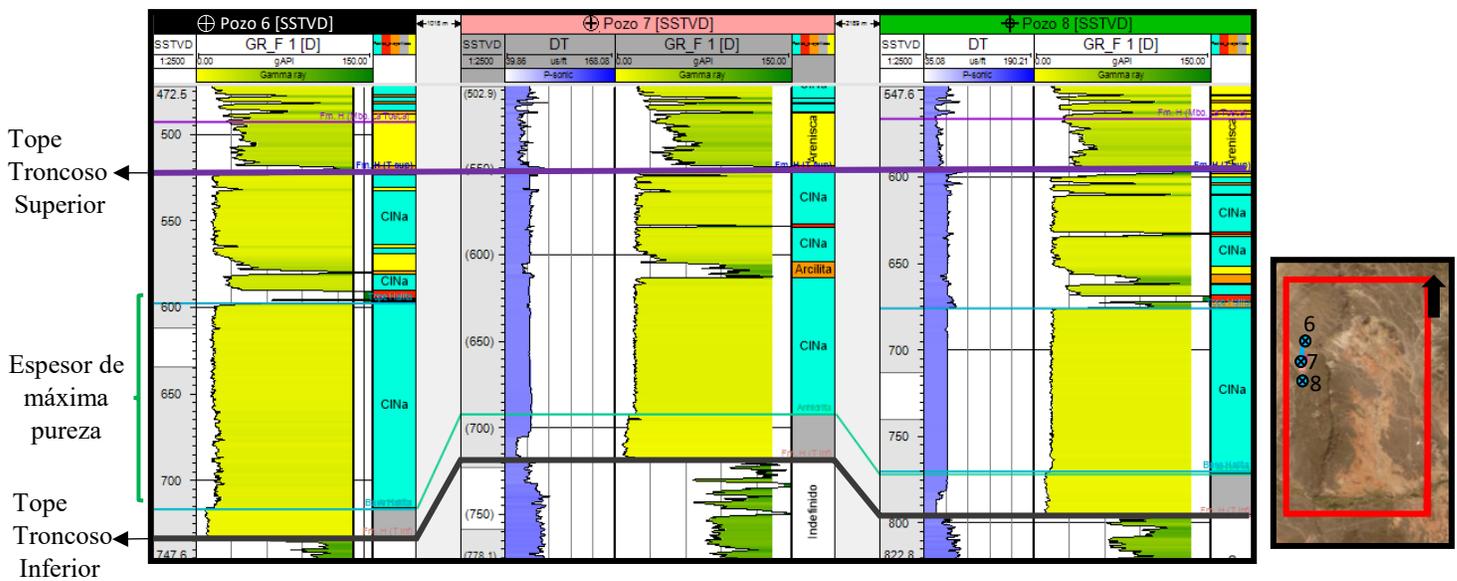


Figura 32. Cross section en el área Norte de la zona de estudio. En verde se referencia el tope y la base de la máxima pureza.

Una vez delimitada la potencia del Mb. Troncoso Superior en cada uno de los pozos del área de estudio, se generó un mapa isópaco, el cual se extiende hacia toda el área de estudio incluyendo las zonas aledañas. En este mapa se puede observar una disminución del espesor hacia el Este debido a que, en esta región, el Mb. Troncoso Superior se deposita en la Plataforma Estructural. Este mapa, representado en la Figura 33, permitió delimitar preliminarmente posibles áreas de interés con un nivel de detalle reducido, ya que los datos de pozo brindan con gran precisión información vertical pero no areal.

La Figura 33 muestra un mapa isópaco con los datos de pozo utilizando todos los pozos, incluidos aquellos que se encuentran por fuera del área de estudio. En este, se puede observar un aumento notable de espesor en el Oeste, que no fue tomado en cuenta como posible área de interés, ya que el mismo podría ser originado por el apilamiento tectónico que genera la faja plegada y corrida, la cual se extiende hasta el límite occidental del área de estudio.

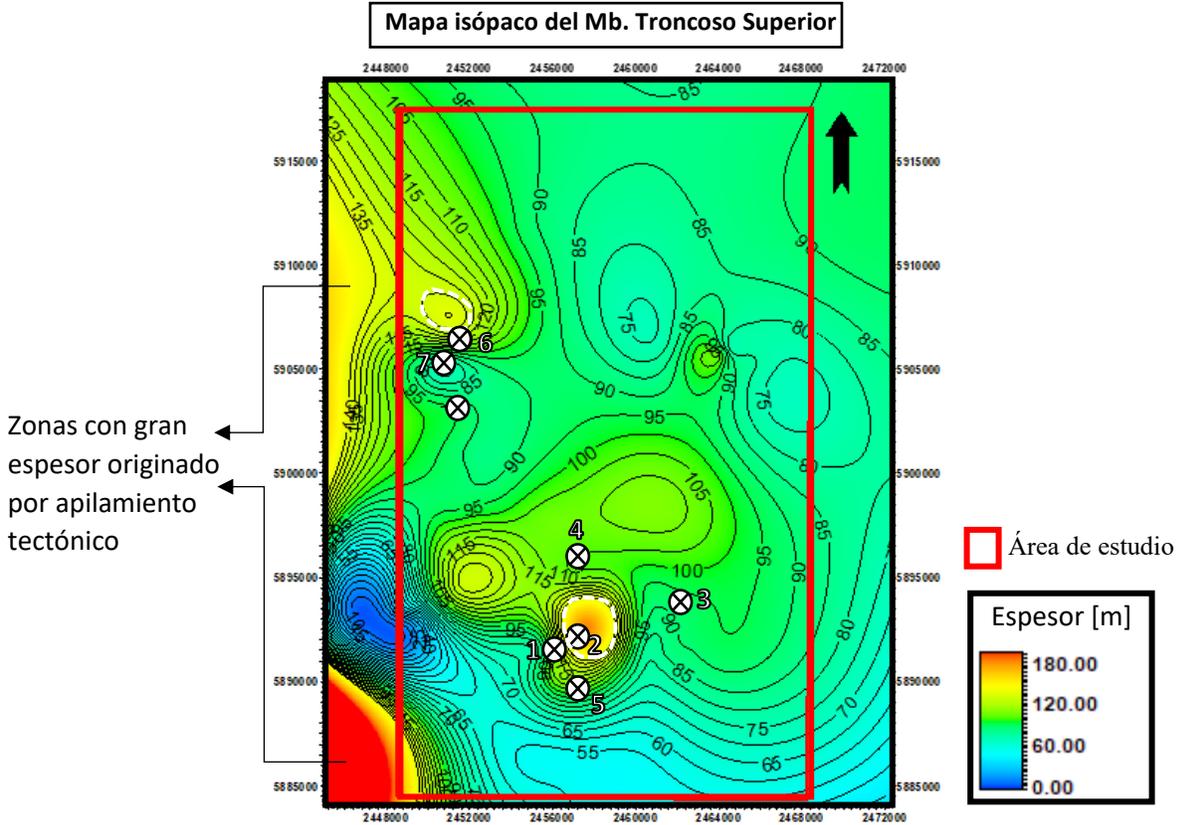


Figura 33. Mapa isópaco con datos de pozo. Con circunferencias blancas discontinuas se referencia las dos zonas de mayor interés.

Además, se realizó un mapa isópaco de las impurezas, constituidas principalmente por arcilitas y anhidrita y en menor medida areniscas y silvinita. Como se observa en la Figura 34, las zonas de mayor espesor del Mb. Troncoso Superior presentan potencias de las impurezas de hasta 5 m en el sector circundante a los pozos 1 y 2, mientras que en la zona circundante al pozo 6, las impurezas son más abundantes con hasta 10 m de espesor en total.

Mapa isópaco de impurezas en el Mb. Troncoso Superior

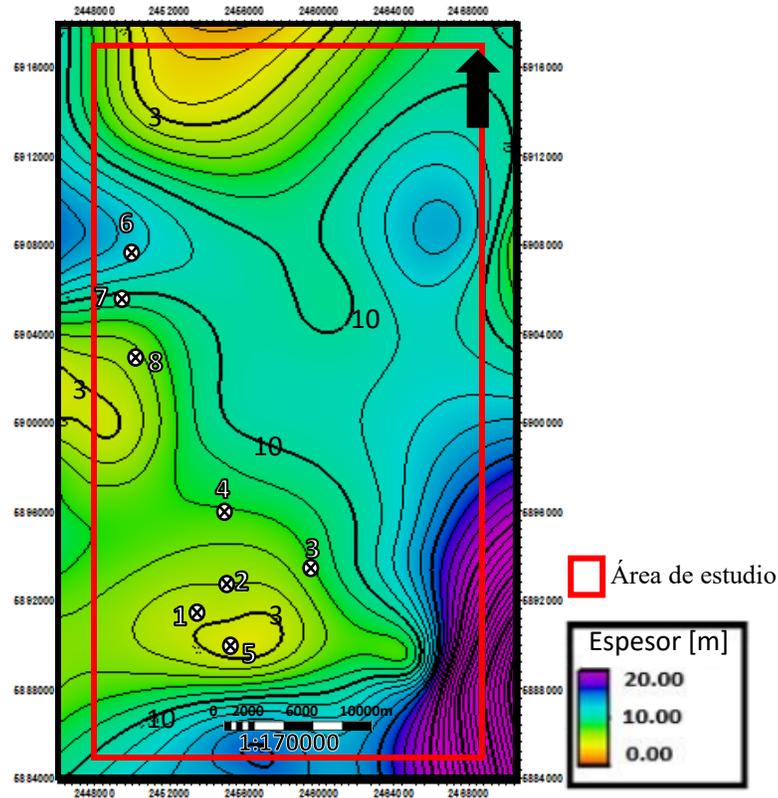


Figura 34. Mapa isópaco de impurezas.

Finalmente, el análisis de datos del pozo permitió calcular un promedio de impurezas dentro del Mb. Troncoso Superior, que es del 19%. Este dato es importante a considerar en los volúmenes finales, ya que solo el 5% de estas impurezas se disuelve (silvinita), mientras que el resto se acumula en el fondo de la caverna.

Interpretación sísmica

Correlación pozo-sísmica

Para lograr una correlación entre el dato de pozo y la información sísmica, es necesario obtener una ley de velocidad, la cual permite relacionar el tiempo sísmico (tiempo que tarda una onda en ir a un reflector y volver a superficie) con la profundidad. Esto es necesario ya que la información obtenida del pozo es precisa en cuanto a la profundidad de las formaciones y sus litologías, pero carecen de representatividad areal. Por otro lado, en los volúmenes sísmicos, la información cubre grandes áreas, pero no cuenta con alta precisión vertical, por lo que esta correlación permite ajustar las profundidades de los diferentes reflectores sísmicos e identificarlos correctamente.

Existen diversos métodos que permiten generar la ley de velocidad: 1) perfil sónico y densidad, que en general se registran en la mayoría de los pozos y tiene un bajo costo, 2) prueba de velocidad (*check shots*) y 3) perfil sísmico vertical (*VSP*), siendo estos últimos los más precisos y los que más información brindan respectivamente. En este trabajo, se utilizó el primer método, ya que no se cuenta con *check shots* o *VSP*.

Los perfiles sónicos miden el tiempo que tarda una onda sonora en recorrer una distancia conocida, denominado como “tiempo de tránsito” (Δt), el cual es inverso a la velocidad de las rocas (V), por lo que se obtiene la siguiente relación:

$$V = \frac{1}{\Delta t}$$

El tiempo de tránsito expresa el tiempo que requiere una onda para atravesar un pie de formación, por lo que sus unidades son microsegundos por pie ($\mu s/ft$). Estos datos permiten obtener el Tiempo de Tránsito Integrado (TTI) el cual es útil ya que relaciona la profundidad en el pozo con la sísmica en tiempo.

A partir de los perfiles Sónico y Densidad se obtiene un perfil de Impedancia Acústica (Z) del cual se extraen los coeficientes de reflexión (CR). Luego, se elige una ondícula (la más parecida a la sísmica posible) para confeccionar el sismograma sintético, el cual es el resultado de la correlación entre los coeficientes de reflexión y la ondícula. Por último, se busca la correlación entre el sismograma sintético y el dato sísmico en la posición del pozo (Fig. 35).

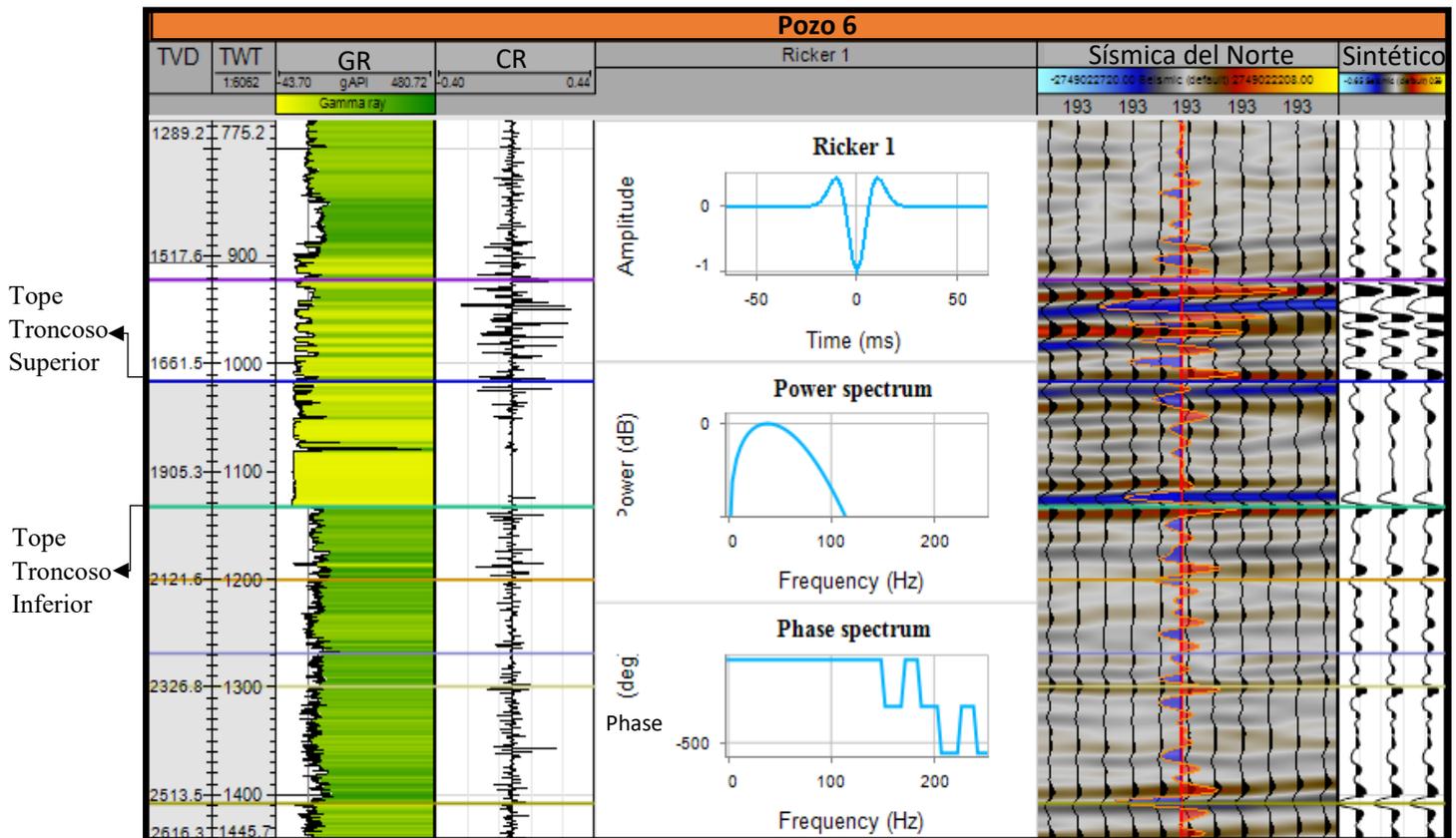


Figura 35. Correlación del pozo 6 con la sísmica.

Esta correlación entre tiempo y profundidad se realizó únicamente en el caso de la sísmica Norte, cuyo dominio es en tiempo, ya que en la sísmica Sur se trabajó en profundidad.

Una vez realizada la correlación, se comenzó con la interpretación en los volúmenes sísmicos con el objetivo de determinar las formaciones, los miembros y las estructuras presentes. Estos volúmenes cubren gran parte del área de estudio, como se muestra en la Figura 36.

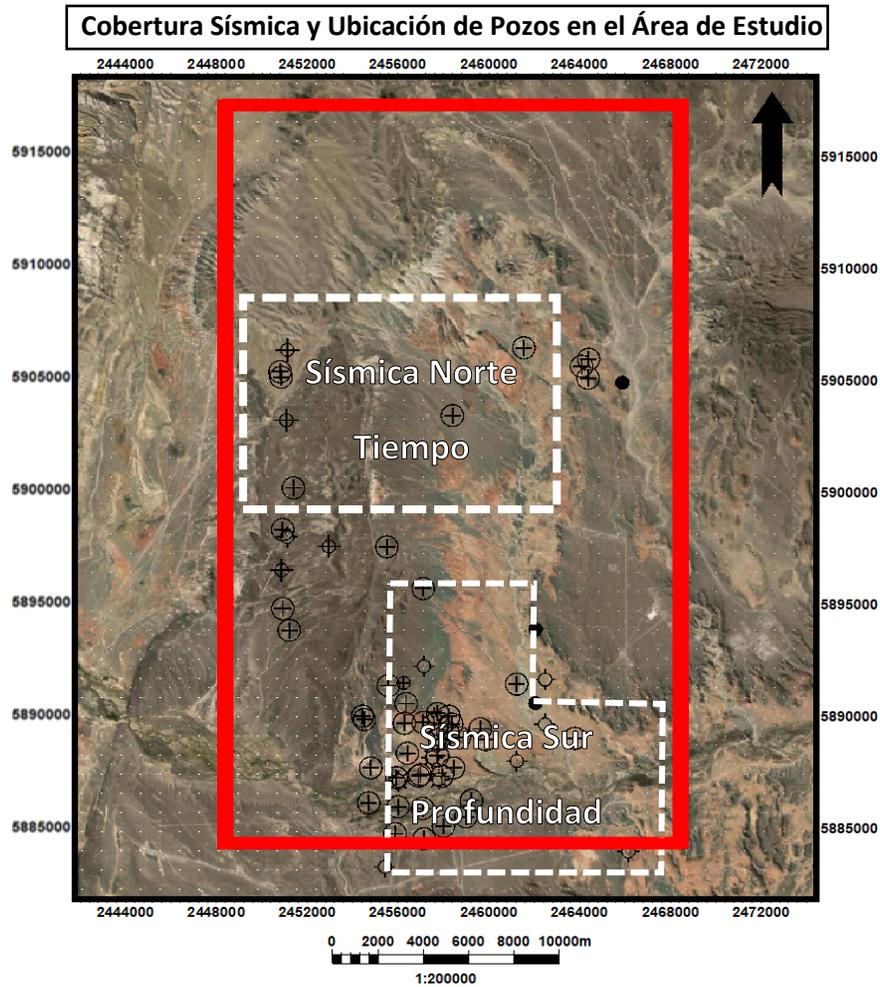


Figura 36. Cobertura sísmica en el área de estudio.

Los cuerpos salinos se reconocen fácilmente en el dato sísmico por dos razones principales: 1) presentan un alto contraste de impedancias acústicas debido al cambio de velocidad en las ondas sísmicas y 2) una morfología rugosa debido a la reología de la halita. Por lo tanto, se interpretaron distintos horizontes, con el tope y la base del Mb. Troncoso Superior como principal objetivo. Teniendo en cuenta estas características principales, así como la profundidad a la que se suele encontrar el miembro de interés, se determinó la base y el techo y se realizaron los mapas isópacos, se mapearon posibles fallas profundas que lo afectan y discontinuidades internas.

La Figura 37 muestra la elevación del tope del Mb. Troncoso Superior en el cual se pueden observar las distintas estructuras, con una orientación predominante N-S y algunas NO-SE. En general, existen en toda su extensión discontinuidades dentro de la sal, que son pequeñas estructuras internas que afectan solo al miembro evaporítico y son producidas a partir del esfuerzo

al que se somete la sal. Además, en el sector Oeste y centro-Sur del volumen sísmico del Norte existen algunas fallas inversas que afectan al miembro.

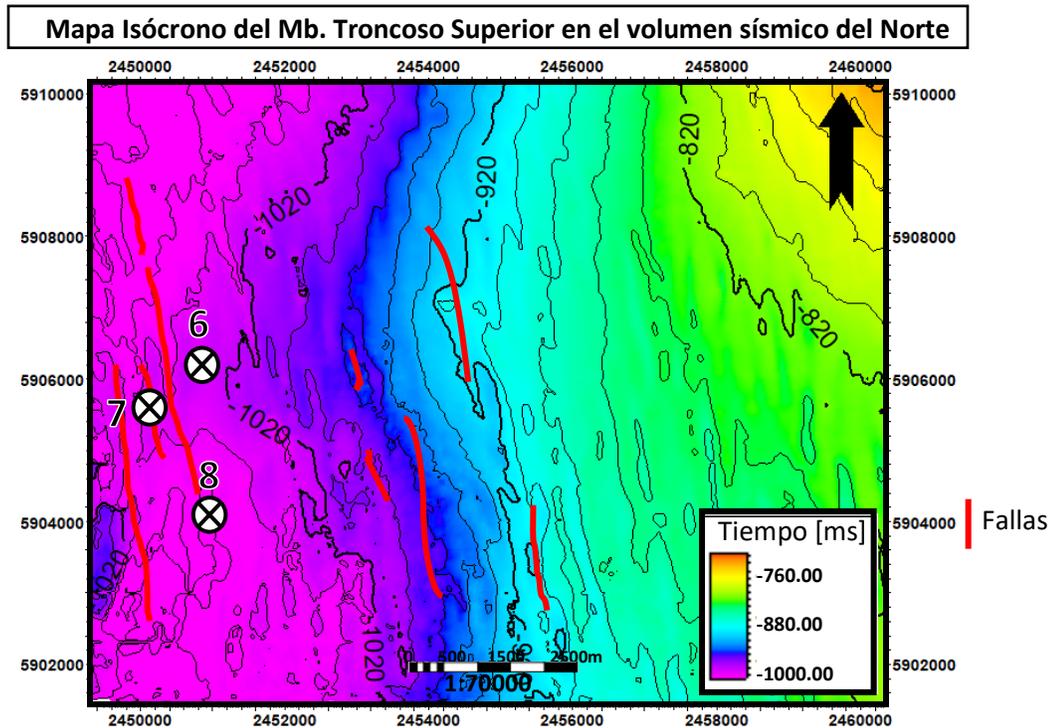


Figura 37. Mapa isócrono del tope del Mb. Troncoso Superior en el volumen sísmico del Norte.

Se realizó una sección sísmica que atraviesa la zona de mayor interés del volumen sísmico del Norte, la que por espesor de máxima pureza y estructura podría ser apta para la creación de cavernas salinas. En el sector Oeste de la sección sísmica, se ve representada en rojo una estructura principal, la cual no afecta la zona de interés (zona con un gran espesor de máxima pureza y sin estructuras que la atraviesan, representada con un recuadro negro de trazado discontinuo en la Figura 38).

Esta figura muestra como la depositación es muy uniforme a lo largo del sector, presentando una profundización y estructuración de las formaciones hacia el Oeste, denotando el frente de la faja plegada y corrida. Hacia el Este, no se observan estructuras de gran envergadura dado que esta área forma parte de la plataforma estructural, por lo que lo único que se desarrollan son las típicas discontinuidades producto de la respuesta reológica de la sal ante la presión litostática y la compresión.

Estructuralmente, se mapearon diversas familias de fallas profundas que afectan al miembro de interés. Además, se detectaron estructuras profundas en el sector Oeste del volumen, con orientación N-S, y algunas discontinuidades en los miembros evaporíticos.

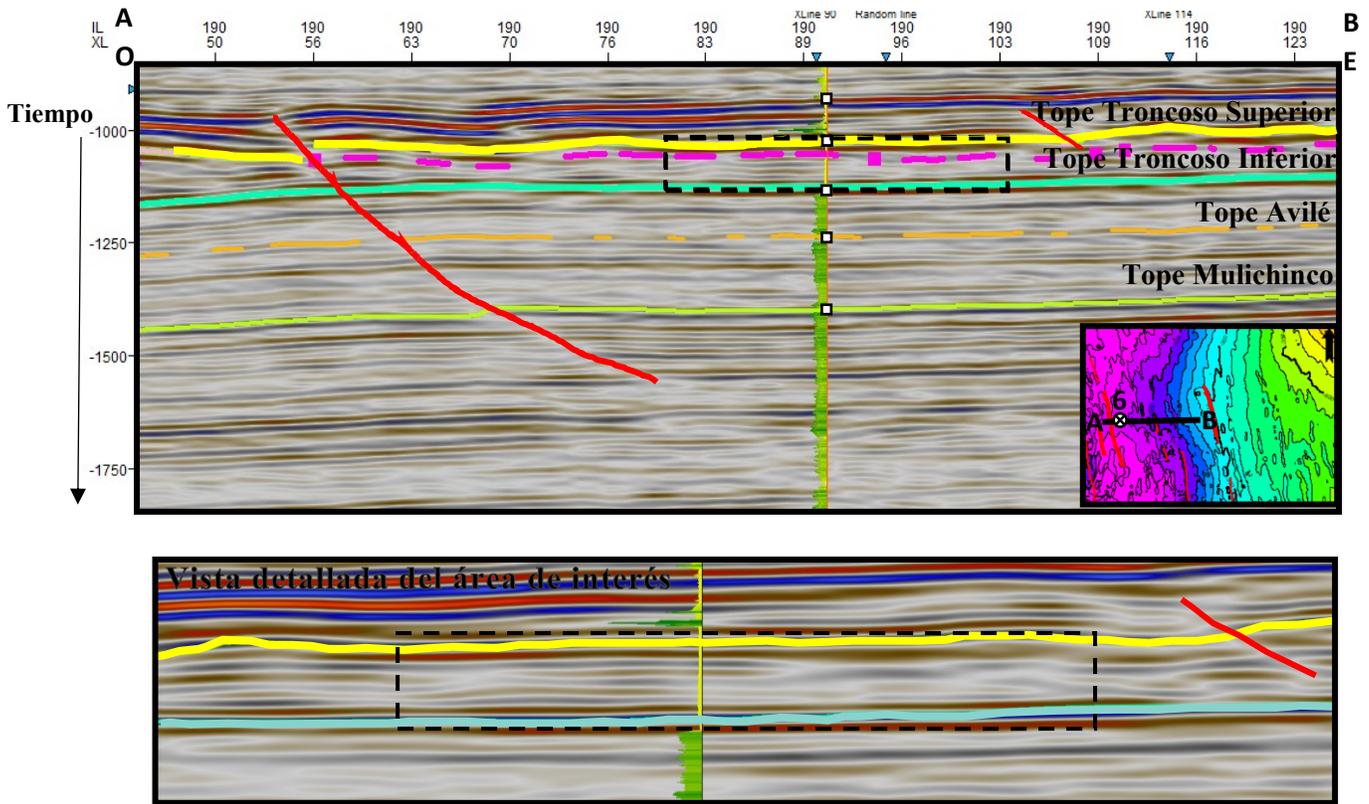


Figura 38. Sección sísmica E-O en el volumen sísmico del Norte que contiene al pozo 6 con la curva de GR. Lo topes se encuentran representados por distintos colores, con dos estructuras que los atraviesa. El recuadro negro de trazado discontinuo marca el área de interés.

En un corte de orientación N-S (Fig. 39) que contiene a su vez el pozo 6, en el que se observa la ausencia de estructuras de gran envergadura con espesores relativamente constantes, siendo mayores en la parte central del corte y menores hacia los extremos, permitiendo delimitar en sentido N-S el área de interés.

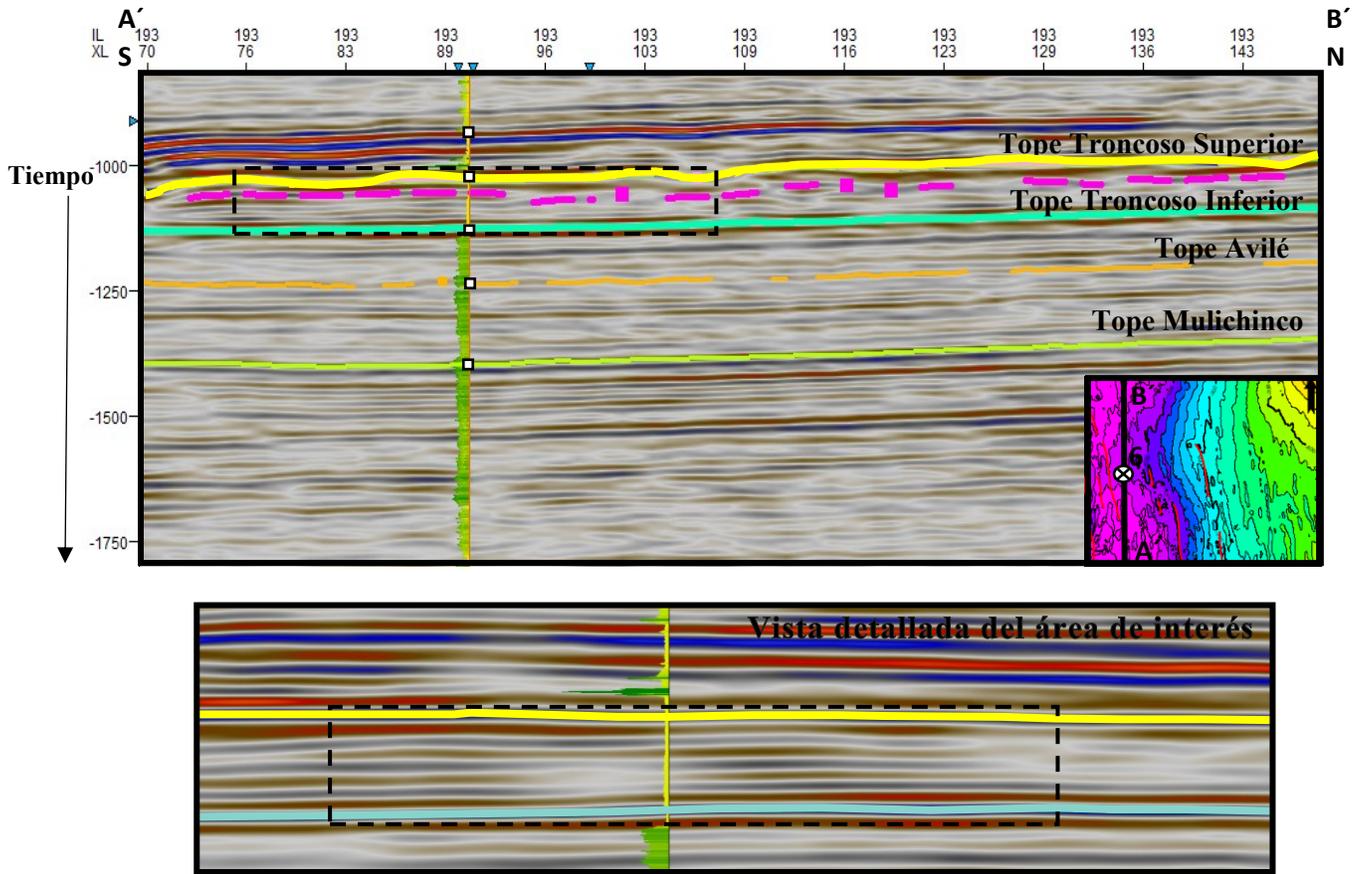


Figura 39. Sección sísmica N-S en el volumen sísmico del Norte que contiene al pozo 6 con la curva de GR. El recuadro negro de trazado discontinuo marca el área de interés.

Hacia el Sur del volumen sísmico del Sur, existe una zona estructuralmente compleja, presentando conjuntos de fallas profundas casi verticales con componentes de rumbo (Fig. 43), fallas menores en sentido ortogonal al mayor esfuerzo y fallas menores que acompañan el dominio estructural N-S provocada durante la reactivación de Cortaderas.

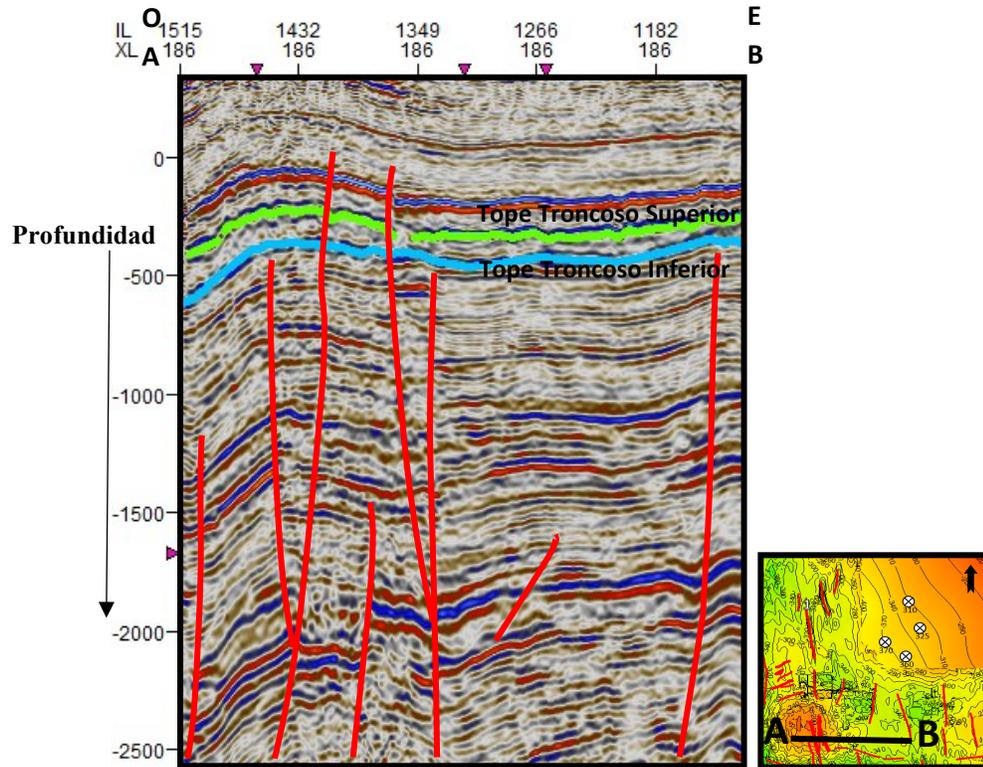


Figura 43. Ejemplo de fallas profundas en el volumen sísmico del Sur

A su vez, se observan estructuras longitudinales N-S (Fig. 44), una de las cuales se encuentra representada en la sección sísmica obtenida en el volumen sísmico del Sur (número 1 en la Figura 40). Se realizó una sección sísmica (Fig. 45) que atraviesa a la falla principal, que es una estructura profunda junto a dos fallas menores (hacia el NE) que afectan al Mb. Troncoso Superior y otras fallas menores (hacia el SO) que afectan al Mb. Troncoso Inferior.

Mapa Estructural enfocado en el sector NE en el volumen sísmico del Sur

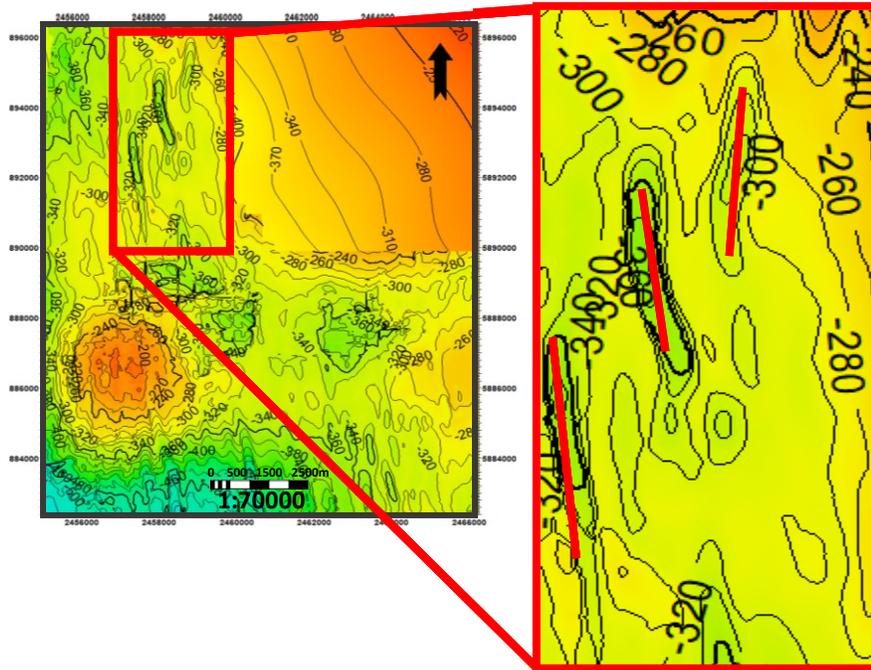


Figura 44. Fallas en el sector Norte del área de interés.

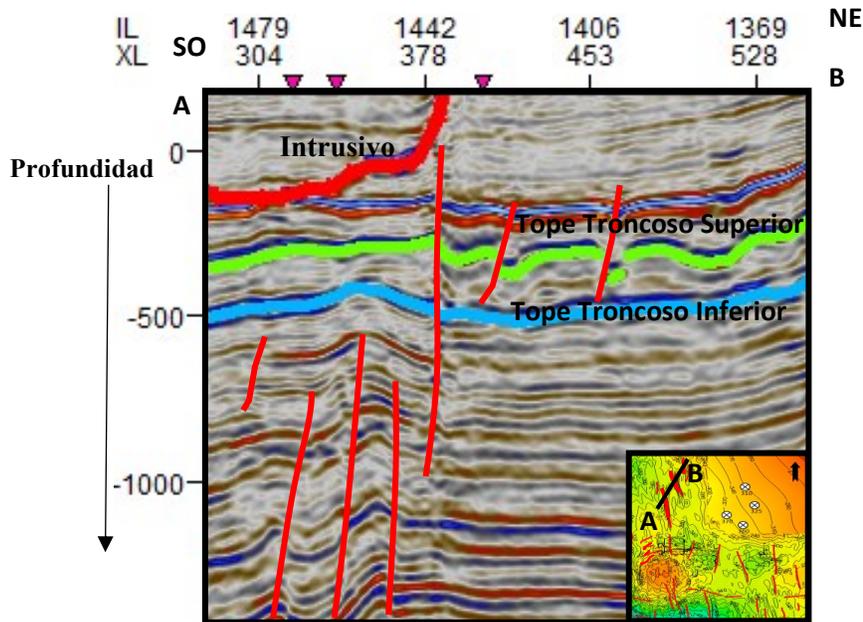


Figura 45. Sección sísmica con orientación SO-NE en el volumen sísmico del Sur.

En resumen, la zona de estudio se complejiza estructuralmente hacia el Suroeste debido a la influencia de las fallas reactivadas del Lineamiento de Cortaderas y a la Faja Plegada y Corrida, siendo el Norte, Noroeste y Noreste una región la cual podría ser apta para el objetivo final del trabajo.

Para la generación del mapa isocronopáquico, se mapearon el tope y la base del Mb. Troncoso Superior (Fig. 46), para realizar con posterioridad un mapa que muestre el espesor en tiempo del Mb. Troncoso Superior en el volumen sísmico del Norte.

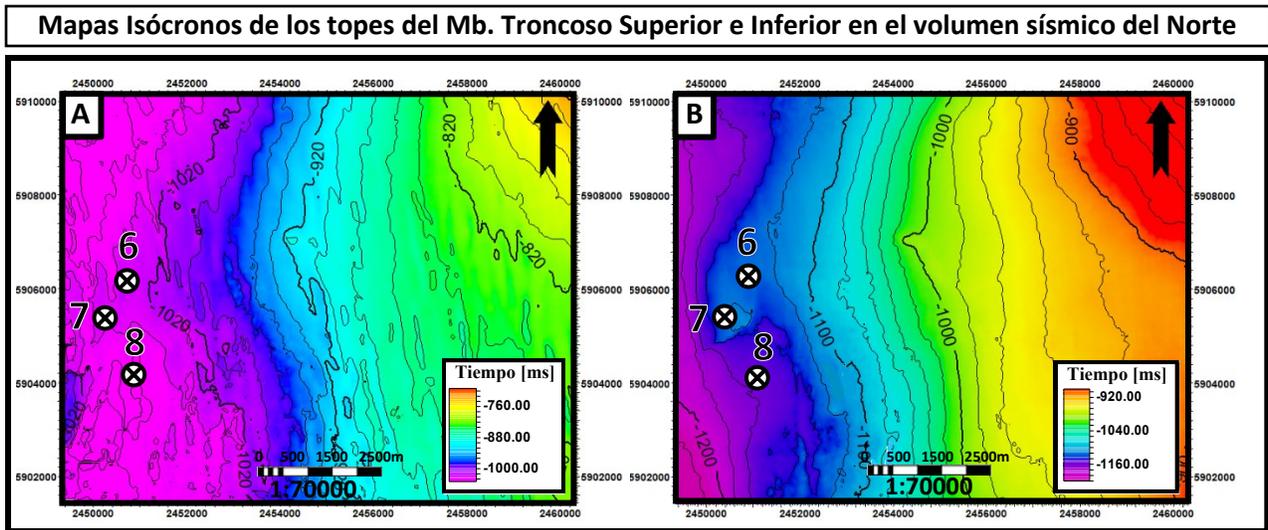


Figura 46. A) Tope de la Fm. Troncoso Superior en el volumen sísmico del norte (elevación). B) Tope de la Fm. Troncoso Inferior en el volumen sísmico del Norte (elevación).

La Figura 47 muestra el mapa isocronopáquico del Mb. Troncoso Superior en el volumen sísmico del Norte, junto con la disposición de la *cross section* utilizada para analizar la información. Se puede observar que los mayores espesores se desarrollan en el sector Oeste debido al apilamiento tectónico. El sector de mayor espesor es el que circunda al pozo 6, en el cual se evidencia una potencia de hasta 215 m.

Mapa isocronopáquico del Mb. Troncoso Superior en el volumen sísmico del Norte

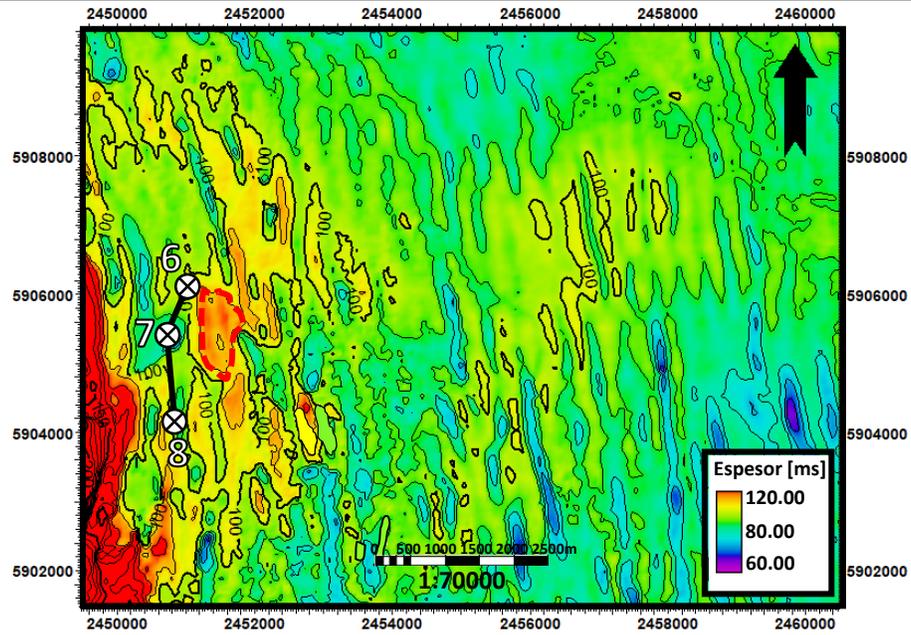


Figura 47. Mapa isocronopáquico del volumen sísmico del Norte con el área de mayor interés representada con un trazo discontinuo rojo.

En general, las estructuras del área se generaron durante la compresión andina, ya sea por reactivación, inversión tectónica o generación de fallas inversas, aunque existen fallas inversas que, aunque son menos frecuentes, son paralelas al esfuerzo compresivo que originó el levantamiento de Los Andes, siendo generadas por inversión tectónica durante la reactivación de las estructuras al Norte del Lineamiento de Cortaderas (Fig. 48).

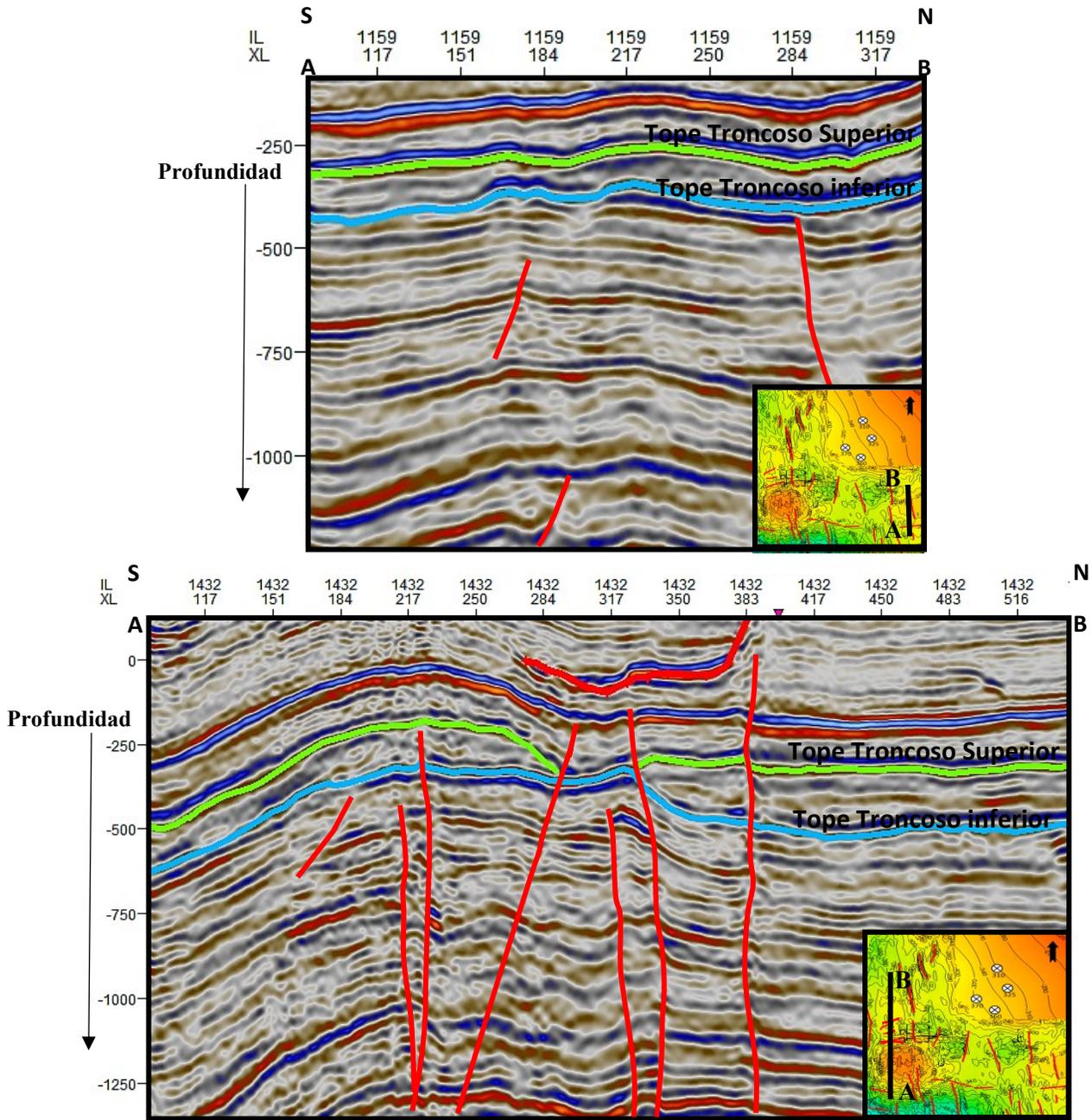


Figura 48. Secciones sísmicas con ejemplos de fallas con orientación E-O en el volumen sísmico del Sur.

El comportamiento de la sal es dúctil ante la compresión, lo que provoca que estos cuerpos tengan una textura rugosa, longitudinal y perpendicular a la dirección del mayor esfuerzo, como se observa en las Figuras 49 y 50. Estas figuras muestran los topes del Mb. Troncoso Superior en ambos volúmenes sísmicos.

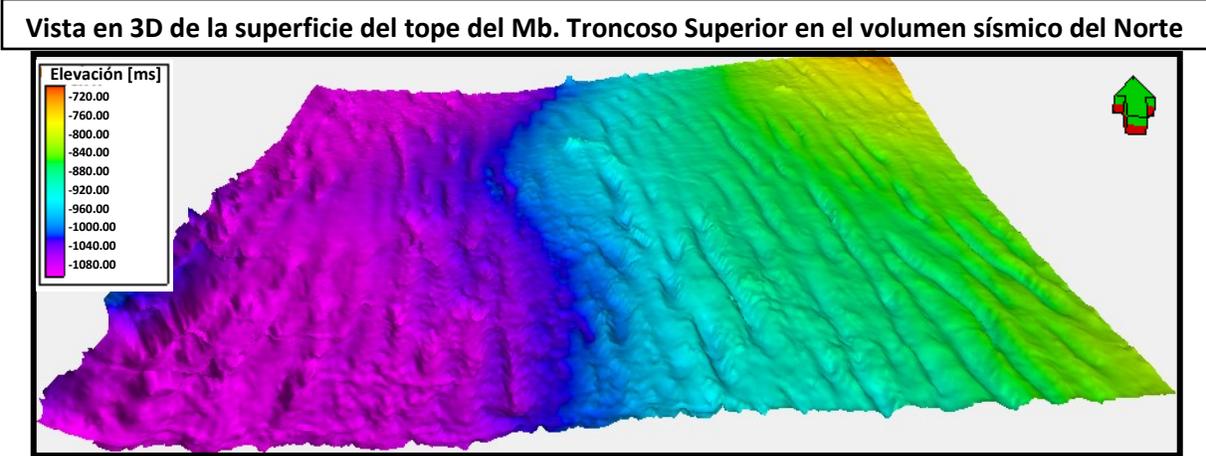


Figura 49. Vista en 3D la superficie extraída del horizonte interpretado en el tope del Mb. Troncoso Superior en el volumen sísmico del Norte.

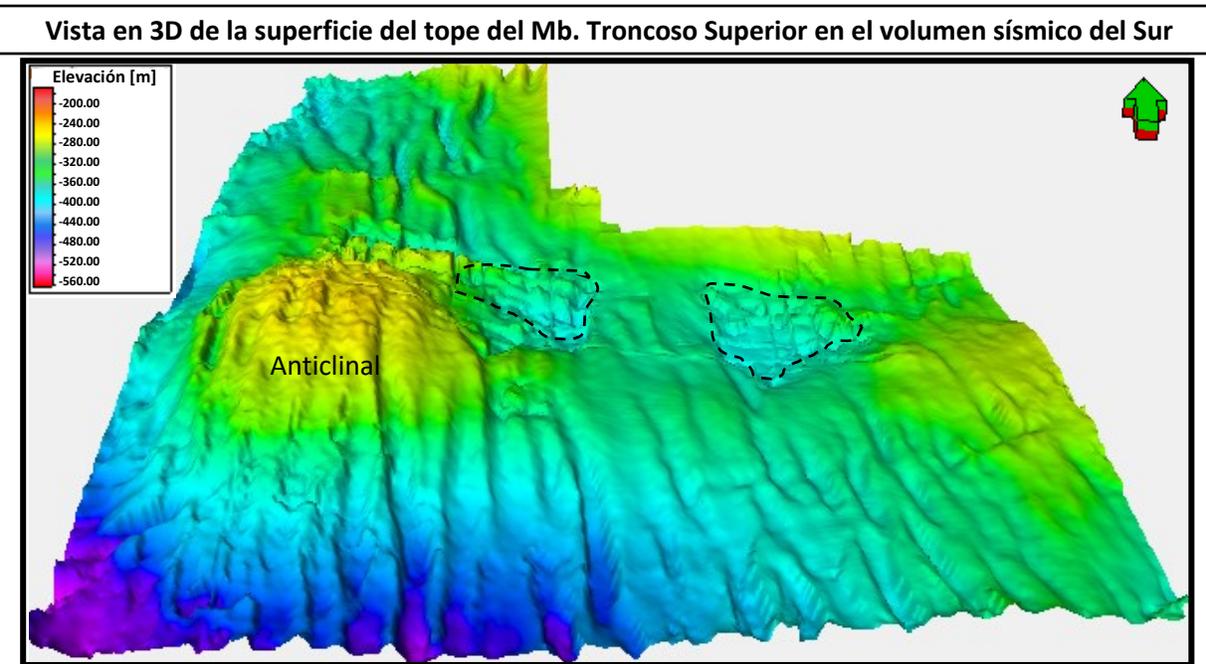


Figura 50. Vista en 3D la superficie extraída del horizonte interpretado en el tope del Mb. Troncoso Superior en el volumen sísmico del Sur. En el sector Oeste de la superficie, se ve representado un anticlinal.

En la Figura 51, se puede observar el mapa isópaco del miembro evaporítico en el volumen sísmico del Sur, en el que se realizaron y analizaron varias *cross sections* que contienen a todos los pozos, de las cuales se representaron aquellas cuya potencia del Mb. Troncoso Superior es considerable. Por lo tanto, se hizo hincapié en los pozos 1 y 2, aledaños al área de mayor espesor, compatible con el objetivo del trabajo. Esta área se encuentra con cierto grado de deformación debido al comportamiento dúctil de las sales ante la compresión.

Hipótesis sobre la ausencia de sal en el sector central de la sísmica del Sur

En el volumen sísmico del Sur, se pudieron mapear los topes formacionales aunque la halita del Mb. Troncoso Superior se encuentra ausente en el sector central de la sísmica que puede ser explicado por dos procesos distintos.

Brechas de colapso

En una primera instancia, Zencich (1993) describe a este proceso como brechas de colapso, generadas, como se esquematiza en la Figura 52, en tres estadios:

- 1) La base del Gr. Neuquén está asociada a cierto grado de estructuración que, a pesar de ser leve, es suficiente para generar la fluencia de la sal del Mb. Troncoso Superior. A partir de ésta, los estratos suprayacentes se flexuran generando despegues en los planos de estratificación y diaclasas.
- 2) Simultáneamente, con la infiltración a través de las diaclasas, circulación de las aguas subterráneas a través de planos de debilidad o debido a que las capas son introducidas dentro de una zona vadosa, comienza el proceso de karstificación (generación de oquedades considerables por disolución).
- 3) Los movimientos orogénicos terciarios estructuraron definitivamente la comarca, con desarrollo de fallas sintéticas y antitéticas que afectan al Mb. La Tosca (Zencich, 1993).

Mapa Isópaco del Mb. Troncoso Superior en el Volumen Sísmico del Sur

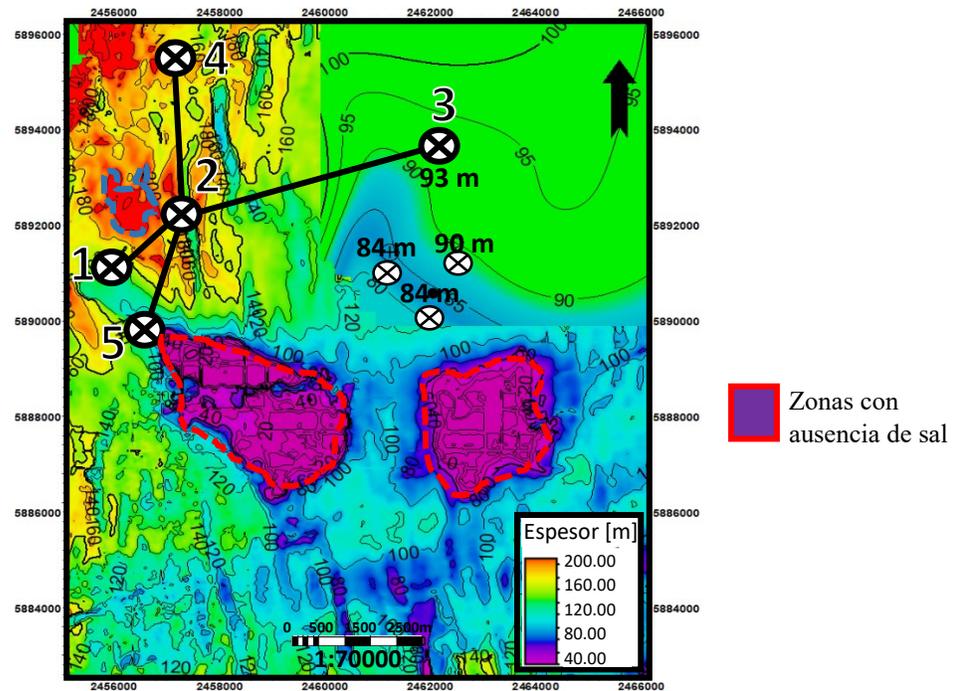


Figura 51. Mapa isópaco del Mb. Troncoso Superior en el volumen sísmico del Sur con y la zona de mayor interés representada con un trazo azul discontinuo.

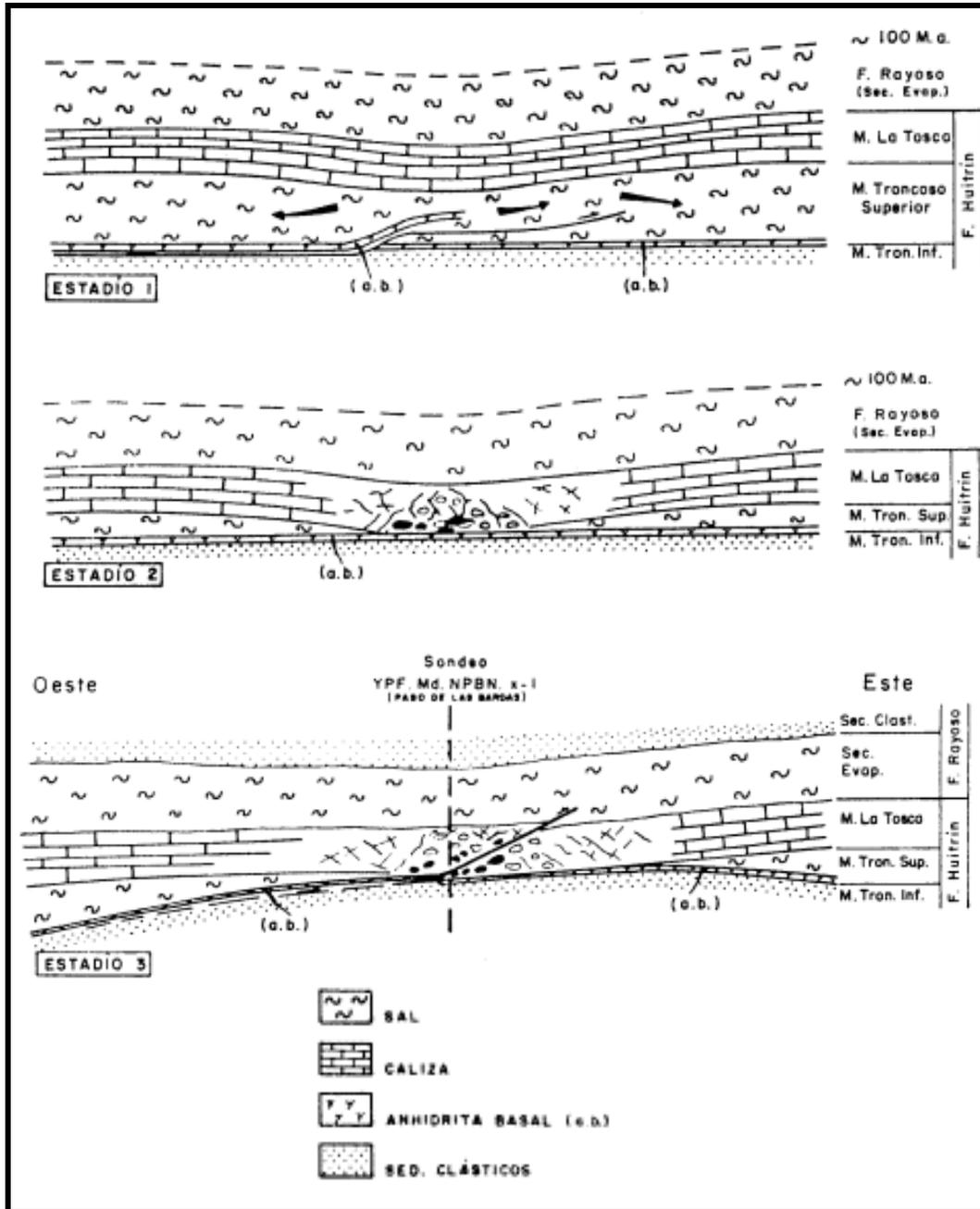


Figura 52. Generación de las brechas de colapso (Zencich, 1993).

Retirada de la sal

Por otro lado, Ge y Jackson (1998), explican este proceso como la fluencia de la sal debido al comportamiento dúctil de la misma ante la presión litostática, denominado como “retirada de la sal”. En este estudio, se simuló el comportamiento de la halita utilizando silicona para representar su naturaleza dúctil, y arena cuarzosa debido a sus propiedades mecánicas similares a las de las rocas sedimentarias que se deforman según el modelo de Mohr-Coulomb en la corteza continental superior. Los resultados indican que la retirada de la sal produce estructuras distintivas,

caracterizadas por una zona interna y una zona externa de extensión. Esta diferenciación permite distinguir entre las estructuras de colapso generadas por la disolución de sal y aquellas formadas por la extensión regional.

La disolución de sal, retiro o flujo de sal e incluso la minería, provocan que los estratos suprayacentes se hundan formando estructuras de colapso. Las estructuras de disolución son características predominantemente en cuencas donde la sal aún se encuentra en forma tabular y no ha sido movilizada para formar diapiros, siendo un proceso común en zonas a lo largo de los bordes de cuencas. Los resultados muestran que las estructuras de colapso pueden distinguirse de los graben formados por extensión regional o por arqueamiento local mediante la presencia de una zona interna de contracción.

En el trabajo se realizaron múltiples modelos en diapiros y un modelo en capas estratificadas, en el cual se eliminó de manera diferencial la sal para conocer la respuesta de los estratos superiores ante esta ausencia total o parcial de la sal. La estructura resultante, ilustrada en la Figura 48, es una etapa avanzada, en la cual se puede observar un suave sinclinal delimitado por flexuras monoclinales (Fig. 53). A medida que la sal se retiraba, la parte inferior del sinclinal se asentó sobre la base rígida pero no se generaron fallas (Ge y Jackson, 1998).

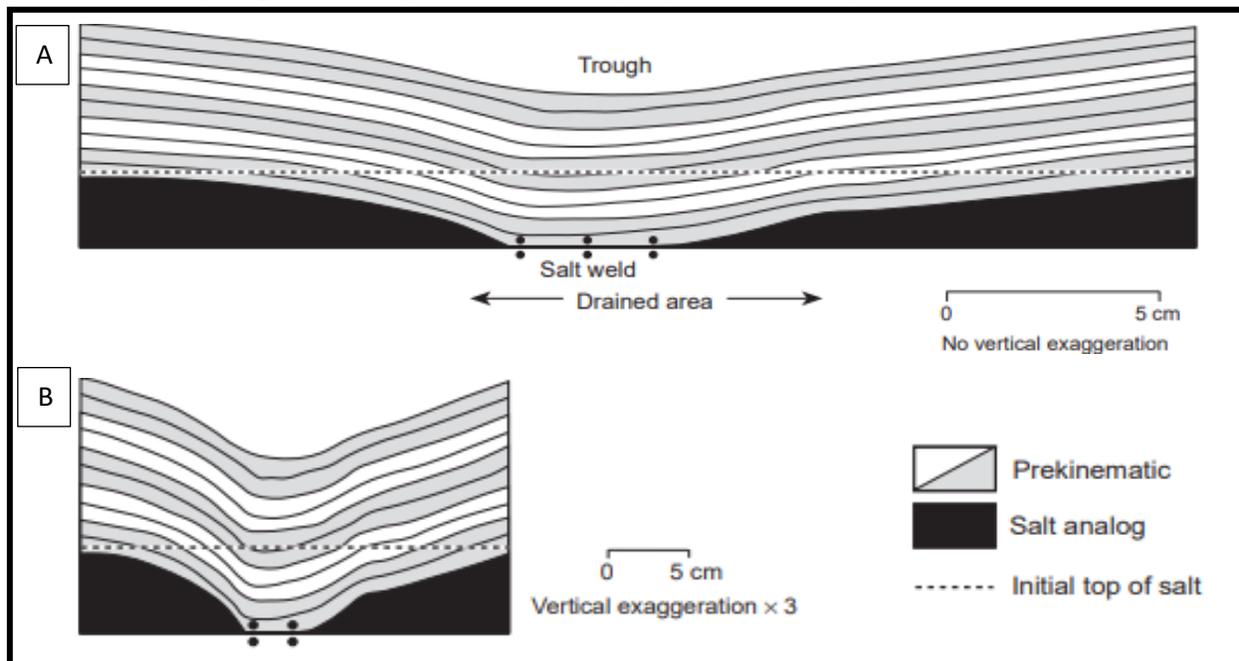


Figura 53. Modelo de retirada de sal en depósitos tabulares. A) Escala verdadera. B) Escala exagerada (Ge y Jackson, 1998).

Estas estructuras se evidencian fácilmente en la sísmica como se muestra en la sección sísmica de la Figura 54, con una orientación E-O atravesando las dos zonas principales en las que fueron desarrolladas. Además, se puede observar la presencia de fallas que afectan al miembro.

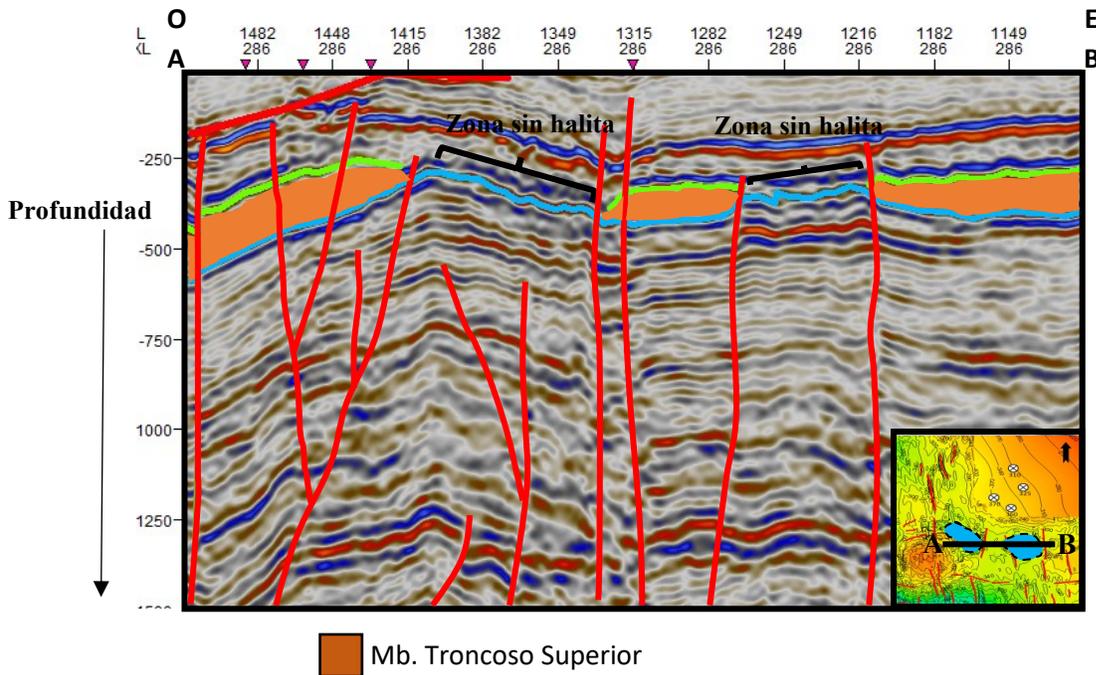


Figura 54. Sección sísmica E-O en la que se evidencia la ausencia de la sal en dos sectores delimitados en el mapa con dos circunferencias negras discontinuas.

Teniendo en cuenta estas dos hipótesis, la retirada de la sal se ajusta con mayor precisión, ya que se reconocen las estructuras monoclinales en los extremos del sinclinal. La estructuración de la zona se generó en un ambiente extensivo y con la posterior compresión, muchas de estas estructuras se reactivaron, así como se originaron nuevas estructuras como el anticlinal presente en el sector Suroeste del área de estudio.

Medidas de mitigación ante la presencia de arcillas

Las arcillas tienen la capacidad de hidratarse, lo que puede provocar una deformación del terreno. Para eso se puede implementar un sistema de drenaje mediante pozos de drenaje y sistemas de bombeo. A su vez se puede aplicar un tratamiento químico como agentes estabilizadores con el fin de reducir la expansividad y contracción de las arcillas (Tauta *et al.*, 2006). El refuerzo del terreno puede realizarse inyectando resinas, lo que las estabiliza y previene la deformación manteniendo la integridad estructural de las cavernas durante la construcción y operación (Iporra, 2019). Por último, debe realizarse un monitoreo geotécnico continuo para detectar cambios en las condiciones litológicas y presión de las aguas subterráneas permitiendo responder rápidamente ante inconvenientes y garantizar la seguridad a largo plazo de las cavernas.

MODELO CONCEPTUAL

Se generó un modelo conceptual de las zonas de interés con el objetivo de poder representar de manera esquemática la morfología de los horizontes y las estructuras presentes.

En principio, se generaron los modelos de ambos volúmenes sísmicos y luego se hizo foco en las dos zonas que implican un potencial alto en cuanto a la generación de las cavernas. En todas las figuras, el tope del Mb. Troncoso Superior se representa en verde, el tope del Mb, Troncoso Inferior se representa en azul y las fallas están representadas en color rojo.

La Figura 55 muestra el modelo conceptual del volumen sísmico del Sur, la cual contiene en el margen izquierdo superior el área de interés delimitada en la sección de Interpretación Sísmica. En la misma se puede apreciar con mayor claridad la densidad de fallas de gran envergadura con orientación predominante Norte-Sur.

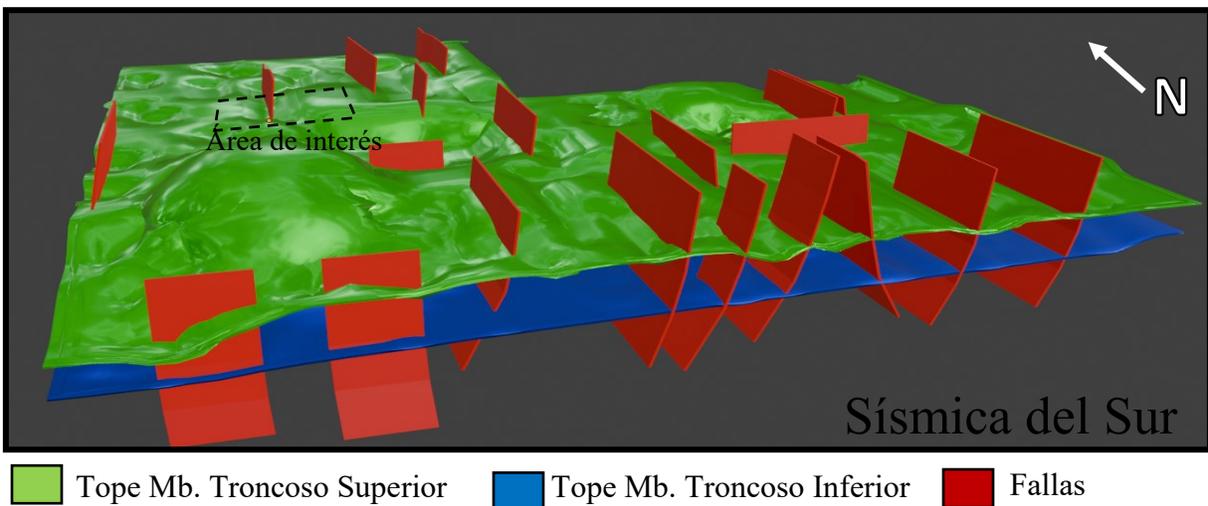


Figura 55. Modelo conceptual del Mb. Troncoso Superior en el volumen sísmico del Sur y las estructuras presentes.

Luego, se esquematiza con mayor detalle el área de interés en la Figura 56, en la que se puede observar el plano de falla que afecta al miembro y la morfología de este.

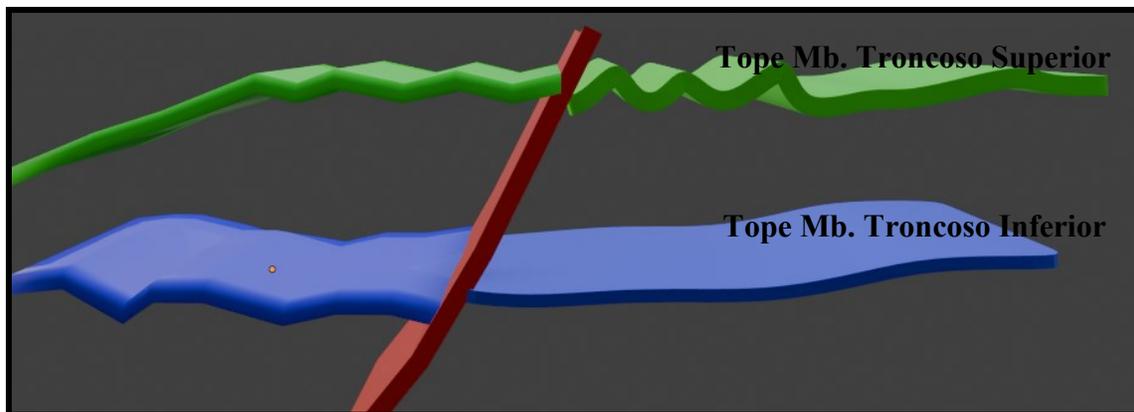


Figura 56. Modelo conceptual del área de interés en el volumen sísmico del Sur.

En cuanto al modelo conceptual del Mb. Troncoso Superior en el volumen sísmico del Norte, se observa una densidad de fallas menor que en el volumen sísmico del Sur, las cuales presentan una orientación predominante N-S a NO-SE. El área de interés en este caso se encuentra en la parte central izquierda de la Figura 57.

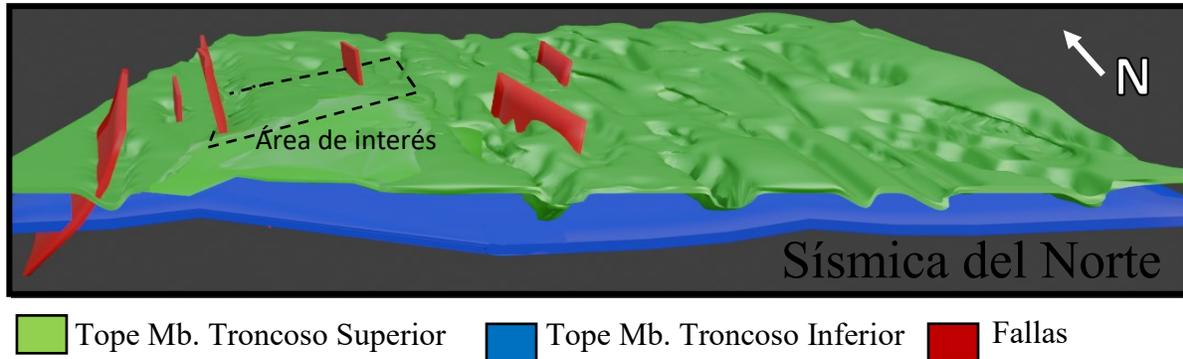


Figura 57. Modelo conceptual del Mb. Troncoso Superior en el volumen sísmico del Norte y las estructuras presentes.

En el área de interés en el volumen sísmico del Norte se puede observar estructuras de gran envergadura, ubicadas en los márgenes de la Figura 58, y una estructura menor ubicada en el centro que afecta únicamente al Mb. Troncoso Superior y al Mb. La Tosca.

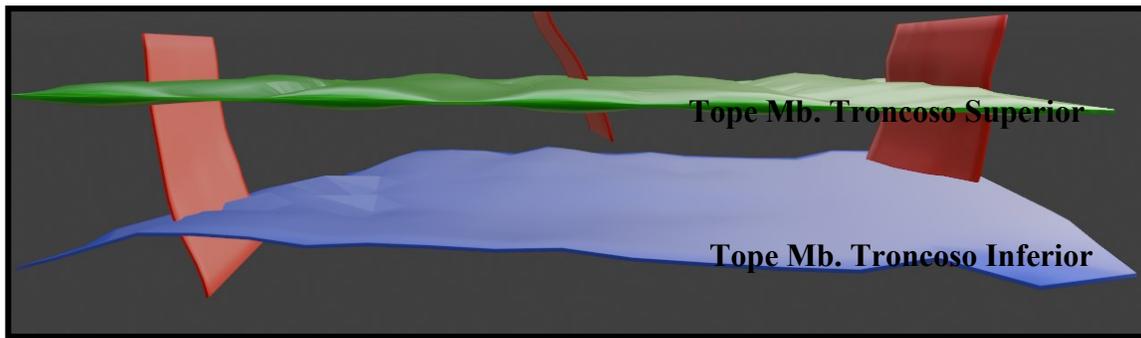


Figura 58. Modelo conceptual del área de interés en el volumen sísmico del Norte.

CÁLCULOS VOLUMÉTRICOS

Para analizar los distintos escenarios posibles de almacenamiento, se estimaron los volúmenes, masas y la energía a almacenar con diferentes probabilidades (Tabla 3). En estos cálculos se utilizó la Ley de los Gases Ideales, lo cual permite determinar la densidad del H₂ a 75°C y 100 atm de presión.

$$\rho = \frac{P \cdot M}{R \cdot t} ;$$

ρ : Densidad [Kg/m³]
 P: Presión [Atm]
 M: Masa Molar [Gr/Mol]
 R: Cte Universal de los Gases Ideales [Atm.L/Mol.°K]
 T: Temperatura [°K]

Utilizando esta ecuación, se estimó que la densidad del H₂ es de aproximadamente 7,07 kg/m³. Al multiplicar este valor por el volumen de la caverna, se obtiene la masa de H₂ que se puede almacenar. Conociendo la densidad energética del hidrógeno, que es de 33 kWh/kg (Cancino Silva, 2021), se puede determinar la cantidad de energía que se podrá almacenar.

En primera instancia, el escenario P90 se denomina como aquel que presenta la mayor probabilidad de éxito, aunque es el más conservador. Con una caverna de 30 m de diámetro y 90 m de altura, podría almacenar hasta 14 GWh de energía.

Por otro lado, el escenario P10 describe un panorama sumamente optimista en términos de dimensiones de la caverna y la energía almacenable. Sin embargo, es el menos probable, ya que desarrollar cavidades de tal magnitud es más próspero en términos energéticos, pero menos seguro. En este escenario, se podría almacenar hasta 92 GWh de energía.

Por último, el escenario P50 representa un término medio entre los escenarios previamente descritos con una energía a almacenar de hasta 45 GWh.

Tabla 3. Cálculo probabilístico de almacenaje de H₂ en el área de interés del volumen sísmico del Norte.

Escenarios	P90	P50	P10
Diámetro (m)	30	50	60
Altura (m)	90	100	140
Volumen 1 pozo (m³)	63617	196349	395840
Masa 1 pozo (Ton)	449	1388	2799
Energía a almacenar (GWh)	14	45	92

En cuanto al área de interés del volumen sísmico del Sur, Cardozo (2024) estima una energía a almacenar de 90 GWh en un escenario probabilístico P10 con cavernas de 60 m de diámetro y 135 m de altura y 14 GWh de energía a almacenar en un escenario P90 con cavernas de 30 m de diámetro y 90 m de alto resultando en un área con mayor energía almacenable.

Tabla 4. Cálculo probabilístico de almacenaje de H₂ en el área de interés del volumen sísmico del Sur (Cardozo, 2024).

Escenarios	P90	P50	P10
Diámetro (m)	30	50	60
Altura (m)	90	100	135
Volumen 1 pozo (m³)	63617	196349	381510
Masa 1 pozo (Ton)	449	1388	2748
Energía a almacenar (GWh)	14	45	90

Factibilidad / Seguridad y medio ambiente

Una vez analizados los volúmenes sísmicos, determinando la estructuración, los espesores y la morfología general y áreas de interés, se analiza en términos de factibilidad, seguridad y medio ambiente.

Previamente, se describieron estructuras aledañas a las zonas con alto potencial para la generación de las cavernas. Estas fallas condicionan el volumen a considerar debido a que pueden tener influencia en la estabilidad y seguridad de las cavernas, por lo que se establecen distancias seguras entre las cavidades y las estructuras, así como una distancia segura entre cavernas. Según Wang, *et al.* (2015), la distancia entre las fallas y las cavernas debe ser superior a dos veces el diámetro máximo de la caverna (hasta 70 metros de diámetro), por lo que esta distancia segura es de 140 metros (Fig. 59).

Por otro lado, hay que tener en cuenta la distancia entre las cavernas, que es un factor muy importante para establecer márgenes estables para la estructura la de cavidad subterránea permitiendo un correcto funcionamiento y eficiente durante toda la vida útil de la caverna. Esta distancia es de hasta dos veces el diámetro máximo lo que previene de posibles filtraciones, daños o deformaciones que podría sufrir una caverna al estar situada muy próxima a otra (Fig. 60) (Wang, *et al.*, 2015).

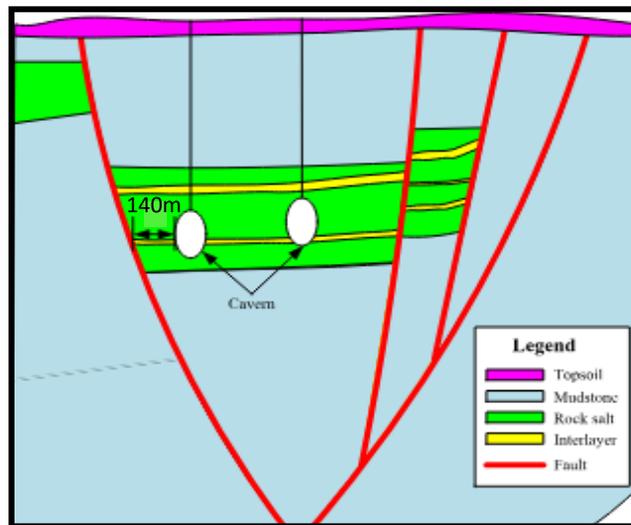


Figura 59. Distancia entre las cavernas y las fallas (Wang *et al.*, 2015)

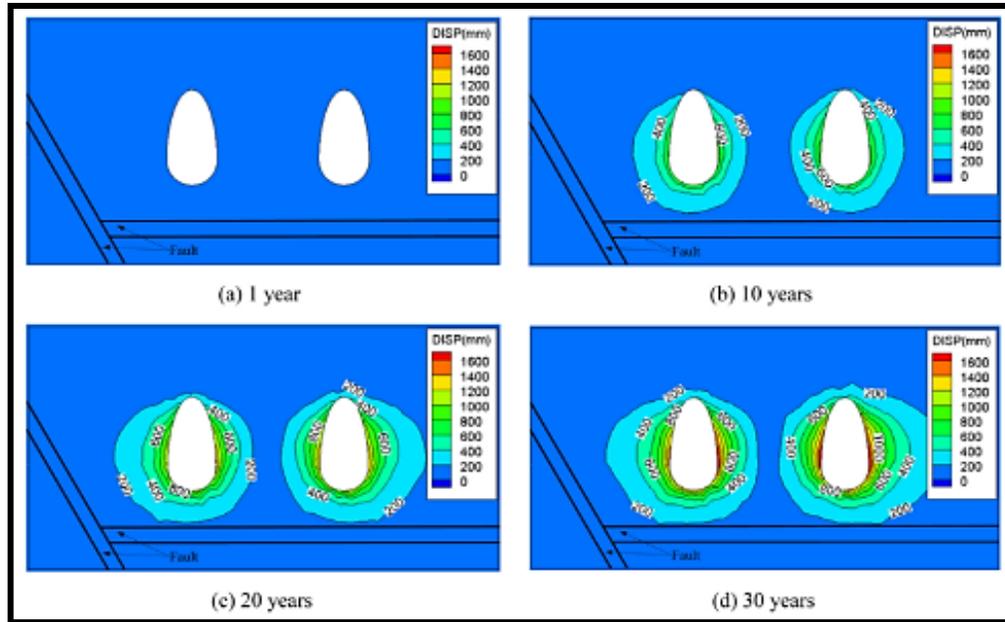


Figura 60. Contornos de deformación de las cavernas a través del tiempo (Wang *et al.*, 2015).

Teniendo en cuenta el volumen delimitado mediante la interpretación sísmica y los análisis de datos de pozo y las distancias entre cavernas y de las cavernas con las fallas (Fig. 61), se estableció la cantidad de cavernas en cada zona potencial con sus dimensiones. Es importante tener en cuenta que la morfología de las cavidades es irregular y que existe un porcentaje de insolubles en el fondo de la misma, por lo que el volumen final de cada caverna puede tener menor volumen de almacenamiento que en una situación ideal. Los siguientes cálculos se realizaron interpretando a las cavernas como cilíndricas sin tener en cuenta los insolubles.

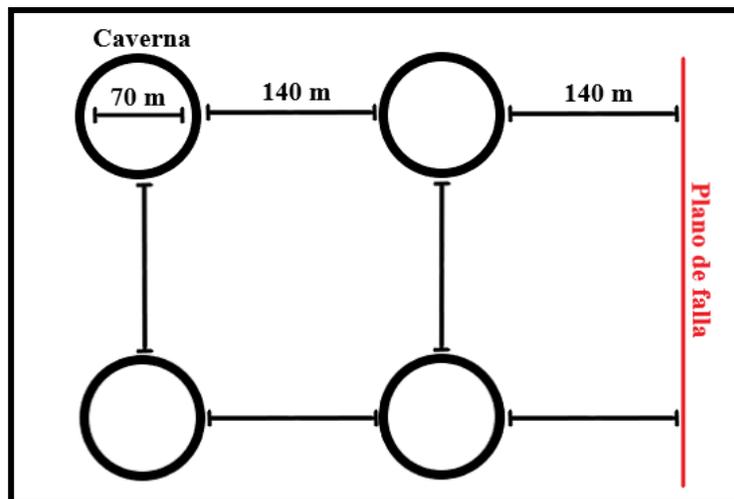


Figura 61. Distancia segura entre las cavernas (70 m de diámetro) y entre las cavernas y las fallas.

En términos de seguridad, se establece una distancia entre el techo de la caverna y el tope del miembro salino de hasta el 75% del diámetro de la caverna, mientras que el espesor entre el fondo de la caverna y el tope del miembro infrayacente debe ser del 20% del diámetro de la caverna (Fig. 62) (Wang, *et al.*, 2015).

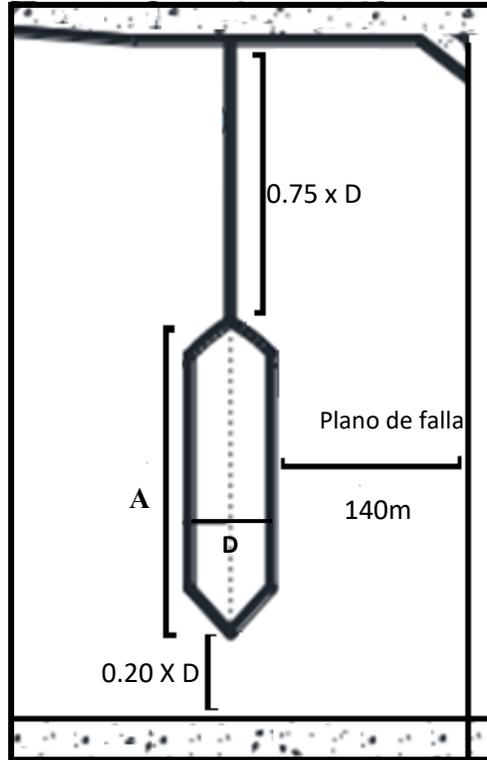


Figura 62. Distancias seguras entre la caverna de sal y el tope y piso del miembro (Modificado de Cai, *et al.*, 2024).

La zona potencial en la sismica del Norte cuenta con una superficie de 545.000 m^2 y espesores de hasta 215 m, por lo que existe la posibilidad de desarrollar hasta 11 cavernas con una altura de hasta 140 m y un diámetro de 60 m con un volumen resultante de cada caverna de 395.840 m^3 (Fig. 63).

Mapa Isocronopáquico del Mb. Troncoso Superior Enfocada en el Área de Interés Norte

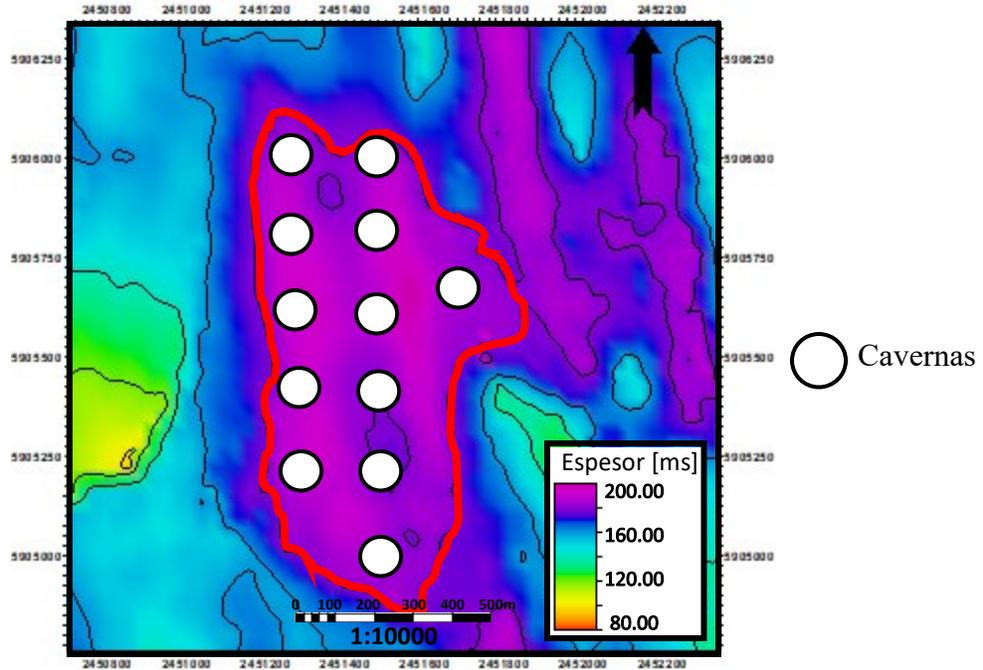


Figura 63. Cavernas en la zona potencial de la sismica del Norte.

La zona potencial de la sismica del Sur cuenta con dimensiones totales mayores con un área de 820.000 m² y espesores de hasta 203 m, por lo que se pueden generar mayor cantidad de cavernas con mayor volumen, con 22 cavernas de 140 m de alto y 60 m de diámetro, lo que resulta en un volumen total de cada caverna de 390.000 m³ (Fig. 64).

Mapa isópaco del Mb. Troncoso Superior enfocado en el área de interés Sur

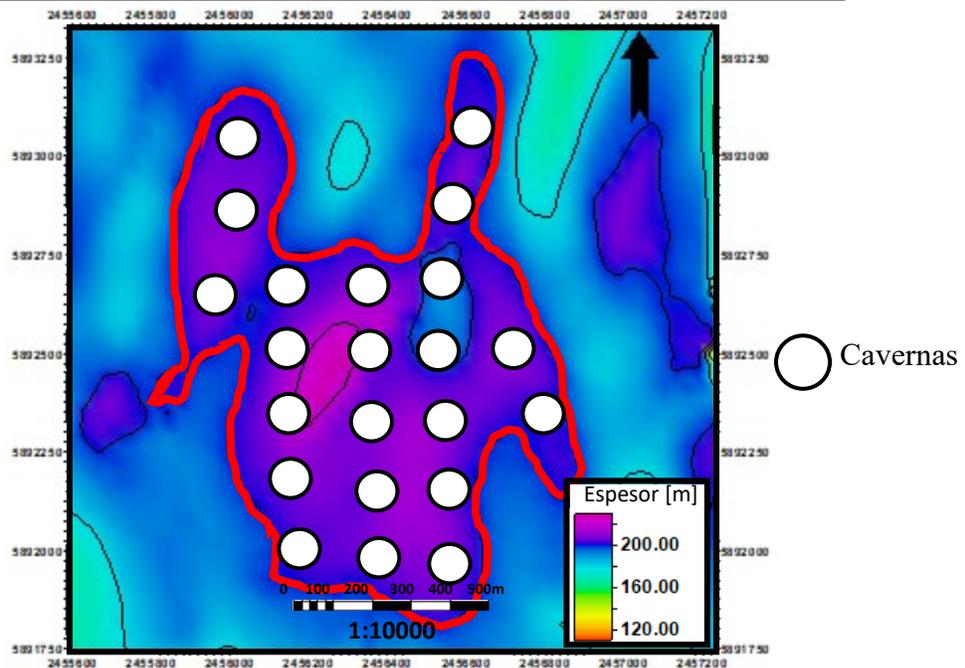


Figura 64. Cavernas en la zona potencial de la sismica del Sur.

Por otro lado, es importante determinar las regiones con poblaciones, asentamientos o producción, debido a que la construcción y preservación de las cavernas en profundidad puede significar un riesgo hacia dichas poblaciones. En este mapa se representaron ambas zonas de interés con el fin de analizar una posible superposición. Como se puede observar en la Figura 65, las áreas de interés no se encuentran en zonas pobladas o de producción.

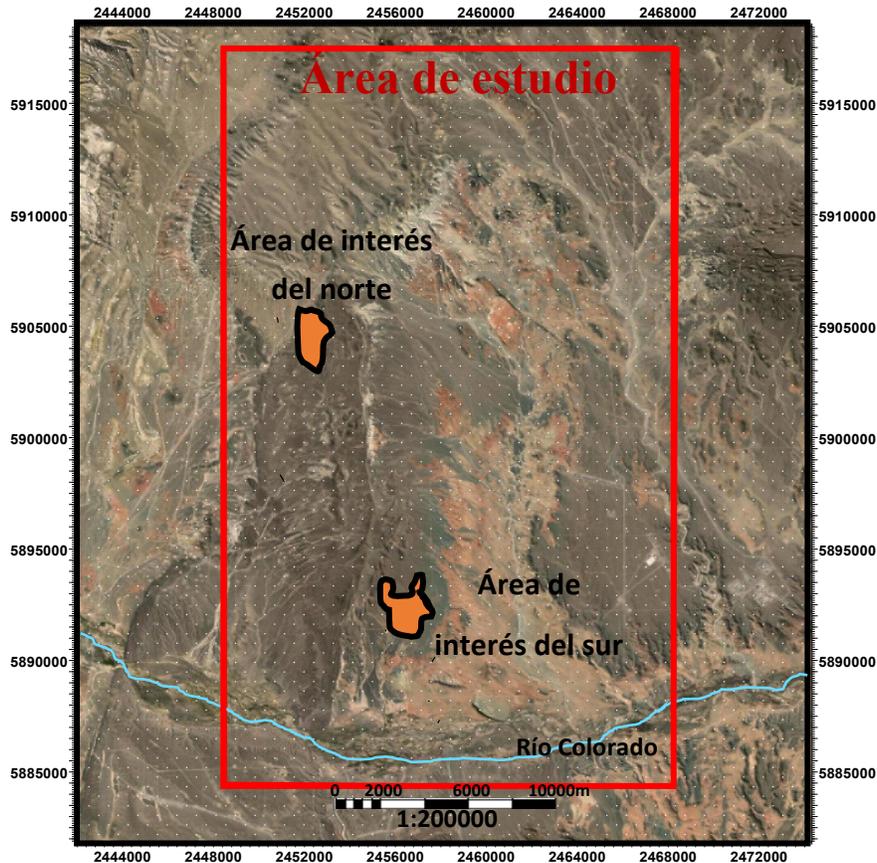


Figura 65. Áreas de interés con la ubicación de los pozos.

Recurso de agua dulce para lixiviación y electrólisis

Todo el sistema hidrográfico del Río Colorado abarca un área de más de 360.000 km² con corrientes que fluyen desde la Cordillera de Los Andes hacia el Este drenando en el Río Colorado (conformado por la confluencia de los ríos Grande y Barrancas). Presenta un régimen nivo-glaciario con los caudales máximos durante la primavera y verano (Lauro *et al.* 2021). Teniendo en cuenta que se necesitan entre 7 y 9 m³ de agua dulce para generar cada metro cúbico de cavidad (Ávila, 2014), se puede establecer al Río Colorado como principal fuente de agua para la construcción de las cavernas ya que el mismo presenta altos caudales máximos (Tabla 4).

Tabla 4. Estadísticas del caudal del Río Colorado (modificado de Lauro *et al.* 2021).

Río	Caudal máximo anual (m ³ /s)	Máximo (m ³ /s)	Mínimo (m ³ /s)
Colorado	486.7	1404.1	96.1

Peligrosidad sísmica

En términos de seguridad, analizando el mapa de peligrosidad sísmico (Fig. 66) se puede observar que la zona de estudio se encuentra en una zona de riesgo bajo, aunque una posible reactivación de fallas debido a la actividad sísmica podría significar un riesgo en la estabilidad de las cavernas.

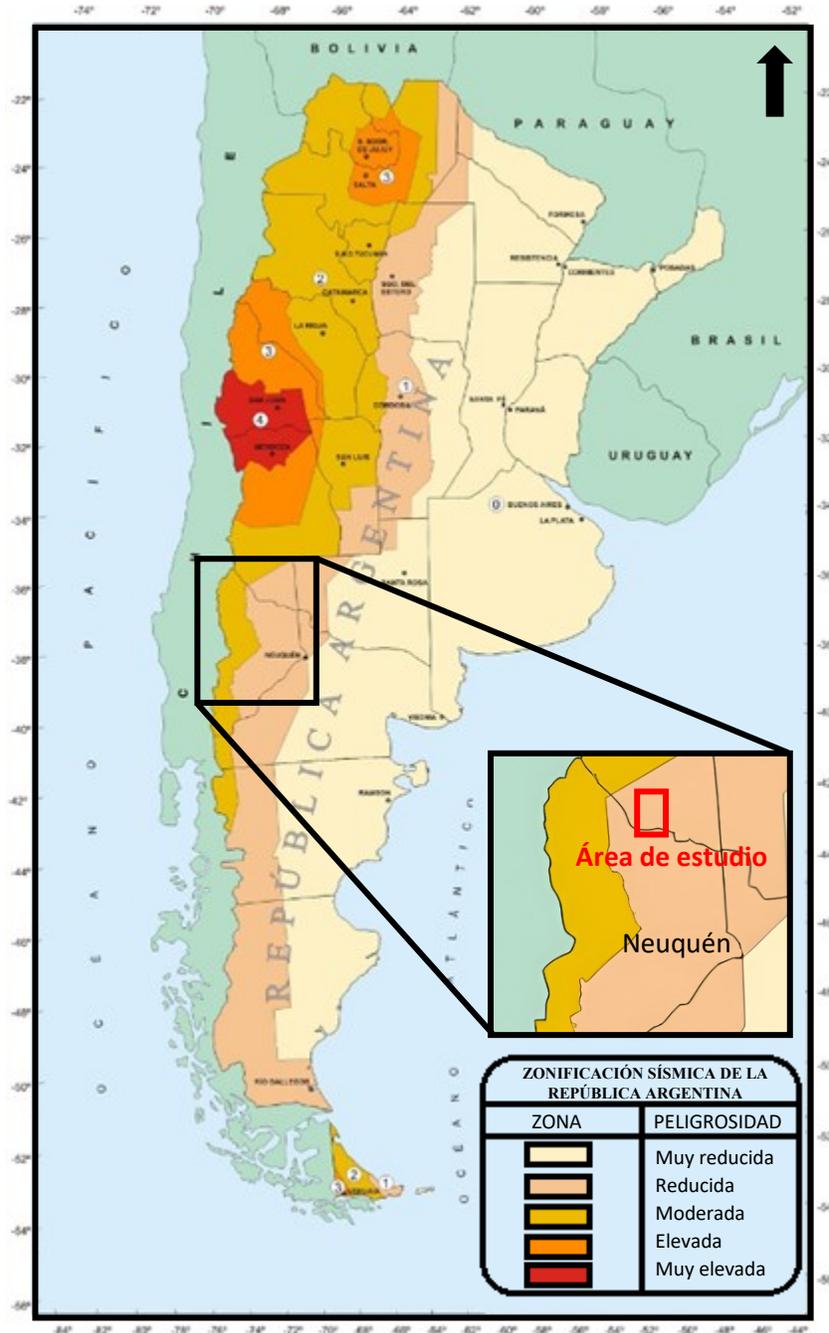


Figura 66. Mapa de zonificación sísmica (modificado de INPreS, 2023).

Conclusiones

Habiendo realizado un detallado análisis de los volúmenes sísmicos y datos de pozo, se pudo determinar el grado de estructuración, los niveles con impurezas y los espesores máximos y mínimos del Mb. Troncoso Superior. Esto permitió delimitar áreas aptas para la construcción de cavernas para el almacenamiento de H₂.

En el área de estudio, se identificaron dos zonas que permitirían la construcción de cavernas salinas. La primera se encuentra en el volumen sísmico del Norte en la que se podrían almacenar 2799 Ton de H₂ lo que equivale a almacenar 92 GWh de energía. La segunda se encuentra en el volumen sísmico del Sur con una menor capacidad de almacenamiento, estimada en 2748 Ton de H₂, equivalente a 90 GWh de energía, similares a los calculados por Cardozo (2024). En total, se podrían almacenar hasta 5547 Ton de H₂, equivalente a 182 GWh de energía.

Es importante tener en cuenta que hacia el Suroeste existe una mayor presencia de fallas y pliegues (Fig. 40), lo que implica un mayor riesgo en términos de estabilidad y seguridad de la caverna.

Además, es crucial optimizar los parámetros de seguridad para garantizar la estabilidad y confiabilidad del almacenamiento de hidrógeno. Entre estos parámetros se incluyen los espesores mínimos del techo y la base de la caverna, así como la distancia entre cavernas y fallas. Considerando estos factores de seguridad, se determinó que en el área de interés del Norte se pueden desarrollar hasta 11 cavernas, mientras que en el área de interés Sur se pueden desarrollar hasta 22 cavernas.

Se encontró que las impurezas en la columna de sal son significativas, con un promedio del 19% en el total del área de estudio. En particular, en el área de interés del Norte, las impurezas son aún más elevadas, con un promedio del 29% en el total del Mb Troncoso Superior. Esto implica que las cavernas en esta área tienen un menor potencial de almacenamiento en comparación con el área de interés Sur.

Discusión

En el sector central del volumen sísmico del Sur, se observa una ausencia de sal debido al proceso de retirada de sal (Ge y Jackson, 1994). Esto se evidencia en las estructuras monoclinales que delimitan la estructura interna sinclinal. Este escenario plantea la discusión sobre por qué estas estructuras se generan en esta región específica de la zona de estudio y no en otras. Esto podría deberse a una mayor influencia de la presión litostática causada por la columna sedimentaria en esta región en comparación con las regiones aledañas.

REFERENCIAS

Argentina.gob.ar (2017). Mapas de irradiancia solar.

<https://www.argentina.gob.ar/economia/energia/informacion-geografica-energia/mapas-irradiancia-solar>

Arregui, C., Carbone, O. y Leanza, H. (2011a). Contexto Tectosedimentario. XVIII Congreso Geológico Argentino Relatorio: 29-36, Neuquén.

Arregui, C., Carbone, O. y Martínez, R. (2011b). El Grupo Cuyo (Jurásico temprano-medio) en la Cuenca Neuquina. XVIII Congreso Geológico Argentino. Relatorio: 77-89, Neuquén.

Ávila, L. (2014). Evaluación de la tecnología CAES como sistema de almacenamiento de energía eólica: Caso de estudio en España (Proyecto final de carrera). Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas, Departamento de Explotación de Recursos Minerales y Obras Subterráneas.

Balod, M., (1999). Proyecto Potasio Río Colorado, Mendoza-Neuquén. En: Zappettini, E. (Ed): Recursos Minerales de la República Argentina. Instituto de Geología y Recursos Minerales SEGEMAR, Anales 35: 1077-1081. Buenos Aires, Argentina.

Barco Burgos, J., Eicker, U., Saldaña-Robles, N., Saldaña-Robles, A. L., y Alcántar-Camarena, V. (2020). *Thermal characterization of an alkaline electrolysis cell for hydrogen production at atmospheric pressure. Fuel, 276, 117910.*

Bengochea, J. y Padula, V., (1992). Evaluación geológica-económica del Proyecto Potasio Río Colorado, Mendoza, Argentina. 4º Congreso Nacional y 1º Congreso Latinoamericano, Actas 1: 253-261. Córdoba, Argentina.

Cáceres, J. (2018). Caracterización estratigráfica del Grupo Neuquén en el Sector Oeste del Yacimiento Estación Fernández Oro (EFO): definición de los principales niveles sellos a través de datos de subsuelo (Trabajo Final de Licenciatura). Universidad Nacional de Río Negro, Argentina.

Cai, R., Ma, H., Liang, X., Zhao, K. y Yang, C. (2024). *Allowable Pillar Width for Salt Cavern Gas Storage Based on Triangular Well Layout: A Case Study in China. Energies, 17, 324.*

Camacho, J., Reyes, O., Mayorga, C. y Méndez, D. (2006). Evaluación de aditivos usados en el tratamiento de arcillas expansivas. Ciencia E Ingeniería NeoGranadina, Vol. 16(2): 45–53.

Cammesa, (2024). Energías Renovables.

https://cammesaweb.cammesa.com/erenovables/?doing_wp_cron=1715859489.7676949501037597656250

Cancino Silva, R. (2021). Producción y almacenamiento de hidrógeno verde para aplicaciones energéticas en Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Mecánica, Univesidad de Chile, Chile.

- Cardozo, J.** (2024). Posibilidades de almacenaje de hidrógeno verde en el subsuelo de la Cuenca Neuquina y del Golfo San Jorge (Tesis de maestría en Economía y Política Energético Ambiental). Facultad de Economía y Administración, Universidad Nacional del Comahue.
- Casadío, S.** (2015). Geología de la Cuenca Neuquina y sus sistemas petroleros: una mirada integradora desde los afloramientos al subsuelo. En: Ponce, J. J., Montagna, A. O., Carmona, N. (eds.), Fundación YPF. Universidad Nacional de Río Negro. Viedma, Argentina.
- Cobbold, P. y Rosello, E.** (2003). *Aptian to recent compressional deformation, foothills of the Neuquén Basin Argentina*. *Marine and Petroleum Geology* 20: 429-443.
- Costa, P.** (2018), *Potencial de Estocagem Subterrânea de Gás Natural em Cavernas de Sal Abertas por Dissolução em Domo Salino Offshore no Brasil* (Tesis Doctoral). Universidad Federal de Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.
- Cremonini, A., Rondina, M., David, M. y Locreille, P., (MEGSA)**, (2021, nov 20). *Webinar "Almacenamiento subterráneo de gas natural"*. (video). Youtube. <https://www.youtube.com/watch?v=xJqMQMa6FtQ>
- Cristallini, E., Tomezzoli, R., Pando, G., Gazzera, C., Martínez, J., Quiroga, J., Buhler, M., Bechis, F., Barredo, S. y Zambrano, O.,** (2009). Controles precuyanos en la estructura de la Cuenca Neuquina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 65 (2). Buenos Aires, Argentina.
- El Mundo**, (2022). El futuro de la energía: Una cueva de sal en Poza para almacenar hidrógeno verde. <https://www.elcorreodeburgos.com/burgos/provincia/221130/135531/futuro-energia-cueva-sal-poza-almacenar-hidrogeno-verde.html>
- Ferreira, F.**, (2009). Caracterización estratigráfica y estructural del Miembro Troncoso Superior, Formación Huitrín, Sinclinal de Huantraico, Cuenca Neuquina, provincial de Neuquén. Vale Argentina SA (Inédito).
- Franzese, J. y Spalletti, L.**, (2001). *Late Triassic.early Jurassic continental extension in southwestern Gondwana: tectonic segmentation and pre-break-up rifting*. *Journal of South American Earth Sciences* 14: 257-270.
- Ge, H., y Jackson, P.** (1998). *Physical modeling of structures formed by salt withdrawal: Implications for deformation caused by salt dissolution*. *Boletín en AAPG*, 82(2), 228–250.
- Geovirtual2**, (2024). Apuntes Geología General: Ambiente Sedimentario. [Apuntes Geología General: Formación de la Sal \(geovirtual2.cl\)](#)
- Gómez Figueroa, J., Monardez, C. y Balod, M.**, (2011). El Miembro Troncoso Superior de la Formación Huitrín (Cretácico Temprano). Relatorio del XVIII Congreso Geológico Argentino: 189-198. Neuquén, Argentina.
- Groeber, P.** (1946). Observaciones geológicas a lo largo del meridiano 70. 1. Hoja Chos Malal. *Revista De La Asociación Geológica Argentina*, 1(3), 177-208.

Groeber, P. y Stipanivic, P. (1953). Triásico. En: P. Groeber, Mesozoico. Geografía de la República Argentina, Sociedad Argentina de Estudios Geográficos, GAEA, 2(1): 13-141. Buenos Aires, Argentina.

Groeber, P., Stipanivic, P. y Mingramm, A. (1953). Jurásico. En: P. Groeber, *Mesozoico. Geografía de la República Argentina*, Sociedad Argentina de Estudios Geográficos, GAEA, 2(2): 143-237. Buenos Aires, Argentina.

Gulisano, C., (1981). El Ciclo Cuyano en el Norte del Neuquén y Sur de Mendoza. VIII Congreso Geológico Argentino. Actas III: 553-557. San Luis, Argentina.

INPreS, (2023). Zonificación Sísmica. Secretaría de Obras Públicas, Ministerio de Economía. <http://contenidos.inpres.gob.ar/accelerografos/Reglamentos#Zonificaci%C3%B3n%20S%C3%A9ismica>

Iporra, R. (2019). Estudio experimental y numérico del comportamiento mecánico de una arcilla mejorada con métodos tradicionales y ceniza de madera (Trabajo final de carrera). Facultad de Ingeniería, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas. Lima, Perú.

Irastorza, A., Turienzo, M., Peralta, M., Irastorza, M., Zavala, C. y Sánchez, N., (2019). La estructura del frente de deformación de la faja plegada y corrida del Agrio a los 38°20'S, Cuenca Neuquina. Revista de la Asociación Geológica Argentina 76 (3): 213-228.

IRENA (2021), *Renewable Power Generation Costs in 2020, International Renewable Energy Agency*, Abu Dhabi.

Jiménez Sáez, F., (2020). Evaluación técnica y económica del uso de hidrógeno verde en aplicaciones para la industria y desplazamiento de combustible fósil. Departamento de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. Santiago de Chile, Chile.

Lauro, C., Vich, A., Moreiras, S., Bastidas, M., Luis, B., Otta, S., Vaccarino, P. y Emilce, L., (2021). Regionalización del caudal máximo anual en cuencas del sistema hidrográfico del Río Colorado, Argentina. Universidad de La Rioja. Cuadernos de Investigación Geográfica 47 (2): 355-370.

Leanza, H. (2003). Las sedimentitas huirinianas y rayosianas (Cretácico inferior) en el ámbito central y meridional de la cuenca Neuquina, Argentina. Servicio Geológico Minero Argentino, Serie Contribuciones Técnicas - Geología 2: 1-31. Buenos Aires, Argentina.

Legarreta, L. (1985). Análisis estratigráfico de la Formación Huirín (Cretácico inferior). Prov. Mendoza (Tesis doctoral). Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, Argentina.

Legarreta, L. (1996). *Early Aptian fluvial lowstand and transgressive sandstones (Troncoso Member, Huirín Formation)*. En: *Main reservoirs in the Central Argentine Andes*. Simposio Bolivariano de Exploración Petrolera, Memoria 2: 5-6. Cartagena de Indias, Colombia.

- Turienzo, M., Lebinson, F., Sánchez, N., Cristallini, E., Araujo, V. y Dimieri, L., (2020).** Kinematics of a backthrust system in the Agrio fold and thrust belt, Argentina: Insights from structural analysis and analogue models. *Journal of South American Earth Sciences* 100. Bahía Blanca, Argentina.
- Vallati, P. (1995).** Presencia de Afropollis (Polen de Angiosperma) en el Cretácico Inferior de la Cuenca Neuquina. En: 6 Congreso Argentino de Paleontología y Bioestratigrafía. Actas 1: 277-290. Trelew, Argentina.
- Vallati, P. (2001).** Bioestratigrafía (Palinología) del Cretácico temprano y medio en la Patagonia septentrional y central (Tesis Doctoral). Facultad de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de la Patagonia "San Juan Bosco" (inédito). Comodoro Rivadavia, Argentina.
- Veiga, G., Spalletti, L. y Schwarz, E., (2011).** El Miembro Avilé de la Formación Agrio (Cretácico Temprano). Relatorio del XVIII Congreso Geológico Argentino: 161-173. Neuquén, Argentina.
- Vergani, G., Arregui, C. y Carbone, O. (2011).** Sistemas Petroleros y Entrampamientos en la Cuenca Neuquina. Relatorio del XVIII Congreso Geológico Argentino. Neuquén, Argentina.
- Vergani, G., Tankard, A., Belotti, H. y Welsink, H., (1995).** Tectonic Evolution and Paleogeography of the Neuquén Basin, Argentina. *Petroleum Basins of South America* 62. Neuquén, Argentina.
- Volkheimer, W. y Salas, A. (1975).** *Die älteste Angiosperm-Palynoflora Argentinien von der typus localität der unterkretazischen Huitrín-Folge des Neuquén - beckens.* Anuario de geología y paleontología, ediciones mensuales 7: 424-436. Stuttgart, Alemania.
- Volkheimer, W. y Salas, A. (1976).** Estudio palinológico de la Formación Huitrín, Cretácico de la Cuenca Neuquina, en su localidad tipo. VI Congreso Geológico Argentino, Actas 1: 433-543. Bahía Blanca, Argentina.
- Volkheimer, W., Quattrocchio, M. Salas, A. y Sepúlveda, E. (1976).** Caracterización palinológica de Formaciones del Jurásico superior y Cretácico inferior de la Cuenca Neuquina (República Argentina). 6º Congreso Geológico Argentino, Actas 1: 593-608. Bahía Blanca, Argentina.
- Wang, T., Yang, C., Ma, H., Daemen, J. y Wu, H., (2015).** Safety evaluation of gas storage caverns located close to a tectonic fault. *Journal of Natural Gas Science and Engineering* 23: 281-293. Hubei, China.
- Zencich, S. y Loza, J., (1993).** Bases preliminares para el análisis del Mb. La Tosca (Fm. Huitrín) en el Yacimiento Paso Bardas Norte y alrededores (Provincias de Mendoza y Neuquén). Área de exploración Neuquén, YPF. Plaza Huinca, Neuquén (Inédito).

Anexo

Descripción de *Cutting* de Pozo Exploratorio en la zona de estudio

En esta descripción se tuvo en cuenta el intervalo comprendido entre 1264.80 m a 1409.80 m de profundidad atravesando un espesor de 145 m.

En general, la composición principal de este intervalo es evaporítica, constituida principalmente por halita translúcida blanca y en menor medida silvinita. También se observó la presencia de delgadas capas de arcilitas grises y castañas intercaladas. En su sección superior se observa la presencia de un intrusivo máfico, representado en la Figura 42 y en su sector basal, el desarrollo de anhidrita.

Se pudo determinar un espesor de Halita de hasta 125 m, con contenidos de impurezas en diversas cantidades (promedio: 13,7%).

Tabla 5. Descripción de *cutting* de un pozo exploratorio en el centro de la zona de estudio.

Profundidad de muestreo	Descripción
1270	Predominancia de calizas gris claro (50%) con ocurrencias de líticos. En menor medida se encuentra halita translúcida (40%) y en menor proporción (10%) se observa la presencia de rocas ígneas de color gris claro.
1275	Predominancia de halita blanca translúcida (70%) y en menor proporción depósitos de arcilita de color gris claro y castaño claro (30%).
1280	Predominancia de halita blanca translúcida (85%) con presencia de depósitos de arcilita de color gris claro y castaño claro (15%).
1285	Predominancia de halita blanca translúcida (90%) con presencia de arcilita gris y castaño claro (10%).
1290	Predominancia de halita blanca translúcida (85%) con presencia de arcilita gris claro a castaño (15%).
1295	Intervalo compuesto netamente por halita blanca translúcida (100%).
1300	Predominancia de halita blanca translúcida (90%) con presencia de arcilita gris claro a castaño (10%).
1305	Predominancia de halita blanca translúcida (90%) con presencia de arcilita gris claro a castaño (10%).
1310	Predominancia de halita blanca translúcida (90%) con presencia de arcilita gris claro a castaño (10%).
1315	Predominancia de halita blanca translúcida (85%) con presencia de arcilita gris claro a castaño (15%).
1320	Predominancia de halita blanca translúcida (85%) con presencia de arcilita gris claro a castaño (15%).
1325	Predominancia de halita blanca translúcida (90%) con presencia de arcilita gris claro a castaño (5%) y ocurrencias de silvinita rojiza translúcida (5%).

1330	Predominancia de halita blanca translúcida (80%) con presencia de arcilita gris claro a castaño (15%) y ocurrencias de silvinita rojiza translúcida (5%).
1335	Predominancia de halita blanca translúcida (85%) con presencia de arcilita gris claro a castaño (15%).
1340	Predominancia de halita blanca translúcida (85%) con presencia de arcilita gris claro a castaño (15%)
1345	Predominancia de halita blanca translúcida (90%) con presencia de arcilita gris claro a castaño (10%).
1350	Predominancia de halita blanca translúcida (90%) con presencia de arcilita gris claro a castaño (10%).
1355	Predominancia de halita blanca translúcida (90%) con presencia de arcilita gris claro a castaño (10%).
1360	Intervalo compuesto netamente por halita blanca translúcida (100%).
1365	Predominancia de halita blanca translúcida (90%) con presencia de arcilita gris claro a castaño (10%).
1370	Predominancia de halita blanca translúcida (85%) con presencia de arcilita gris claro a castaño (15%).
1375	Predominancia de halita blanca translúcida (90%) con presencia de arcilita gris claro a castaño (10%).
1380	Predominancia de halita blanca translúcida (90%) con presencia de arcilita gris claro a castaño (10%).
1385	Intervalo compuesto netamente por halita blanca translúcida (100%).
1390	Intervalo compuesto netamente por halita blanca translúcida (100%).
1395	Predominancia de halita blanca translúcida (80%) con presencia de arcilita gris claro a castaño (20%).
1400	Predominancia de halita blanca translúcida (70%) con presencia de arcilita gris claro a castaño (30%).
1405	Predominancia de halita blanca translúcida (60%) y en menor medida anhidrita blanquecina masiva (30%) con presencia de arcilita gris claro a castaño (10%).
1410	Predominancia de anhidrita blanquecina masiva (70%) y en menor medida arcilita gris castaño (20%) con presencia de halita blanca translúcida (10%).