



## Estudio hidrogeológico integral del yacimiento de hidrocarburos no convencionales La Calera, cuenca neuquina. Procedimientos y resultados.

### Integrated hydrogeological study of La Calera block, an unconventional oil and gas field in neuquina basin. Procedures and results.

Reynaldí, J. M. ✉ - Rodríguez, L. G. - Angel Alvarez, J. B. - Herrera, J. M. - María, S.

Recibido: 23 de julio de 2020 • Aceptado: 7 de agosto de 2020

#### Resumen

*La caracterización de acuíferos en zonas con actividad petrolera cobra importancia al momento de proteger sus condiciones naturales de yacencia, y de evitar cambios que puedan condicionar su futuro uso. Este conocimiento depende tanto de la responsabilidad de las empresas privadas y de las autoridades estatales. Las primeras porque tienen interés en explotar los hidrocarburos en subsuelo, y las segundas por la necesidad de generar un marco legal claro y coherente que permita la obtención de la información necesaria para hacer las evaluaciones. En la cuenca Neuquina, el grupo Neuquén y la formación Rayoso son las principales unidades presentes en superficie. A su vez, gran parte de los pozos perforados atraviesan estas formaciones, consideradas a priori, como las que albergan los acuíferos de mayor vulnerabilidad. Presentan aguas con salinidades menores a los 3.000 ppm de sólidos totales disueltos (STD), condición que obliga a extremar las acciones para su conservación. Este estudio propone una secuencia de trabajo en tres etapas que ha sido aplicada en el bloque La Calera. La primera comprende la caracterización ambiental del área, incluyendo el análisis de información indirecta proveniente de la actividad de la industria petrolera (perfiles eléctricos, información sísmica); una segunda etapa de integración regional, con información obtenida del repositorio virtual generado por la Subsecretaría de Recursos Hídricos (SsRH) de la provincia de Neuquén; y una tercera fase de evaluación de resultados de muestreos directos realizados en pozo. La integración final permite conocer y enmarcar regionalmente las características hidrogeológicas del bloque, pudiendo evaluarse medidas de protección y preservación acordes al impacto que la actividad genera.*

**Palabras clave:** Caracterización, Hidrogeología, Acuífero, Integración, No Convencional.

#### Abstract

*Aquifer characterization and protection in areas with oil and gas activity becomes a challenge, when it comes to avoid*

changes in natural reservoir conditions that may impact in their future use. This knowledge depends both on the responsibility of private companies and state authorities. The former because it is interested in exploiting the oil and gas, and the latter because of the need to generate a clear and coherent legal framework that allows obtaining the information to carry out evaluations. In the Neuquina basin, Neuquén group and Rayoso formation are the main units on surface. In addition, almost all of the drilled wells pass through these formations, which are considered to harbor the shallower and most vulnerable aquifers. The salinity of its waters are generally lower than 3.000 ppm of Total Dissolved Solids (STD in spanish), a condition that requires to extreme the actions for their preservation. A three-stage workflow sequence applied in La Calera block is proposed. The first stage includes the environmental characterization of the area, including the analysis of indirect information from the oil and gas activity (electrical logs, seismic information); a second stage of regional integration, adding information from the virtual storage supported by the Subsecretaria de Recursos Hidricos (SsRH) of Neuquén province; and a third stage of direct well samplings results evaluation. The final integration allows to build a hydrogeological framework of the block that leads to define accurate evaluation and protection measures according to the impact of the unconventional oil and gas activity.

**Keywords:** Characterization, Hydrogeology, Aquifer, Integration, Unconventional.

### UBICACIÓN GEOGRÁFICA Y MARCO HIDROGEOLÓGICO

El bloque La Calera se encuentra ubicado en el sector central de la provincia de Neuquén, en la margen izquierda (norte) del Rio Neuquén, unos 7 km al NNO del Embalse Cerros Colorados. Es una concesión de desarrollo no convencional, operada por Pluspetrol, en sociedad con YPF. (Figura 1).

Si bien el bloque se encuentra ubicado entre dos de los campos gasíferos convencionales más productivos de la cuenca Neuquina (Loma la Lata, al Este y Aguada Pichana, al Oeste), la producción acumulada es baja (905.000 BBLs de condensado y 5,7 BCF de gas).

Desde el punto de vista hidrogeológico, *Colombino y Luengo (2011)*, dividen a la provincia de Neuquén en 7 regiones,

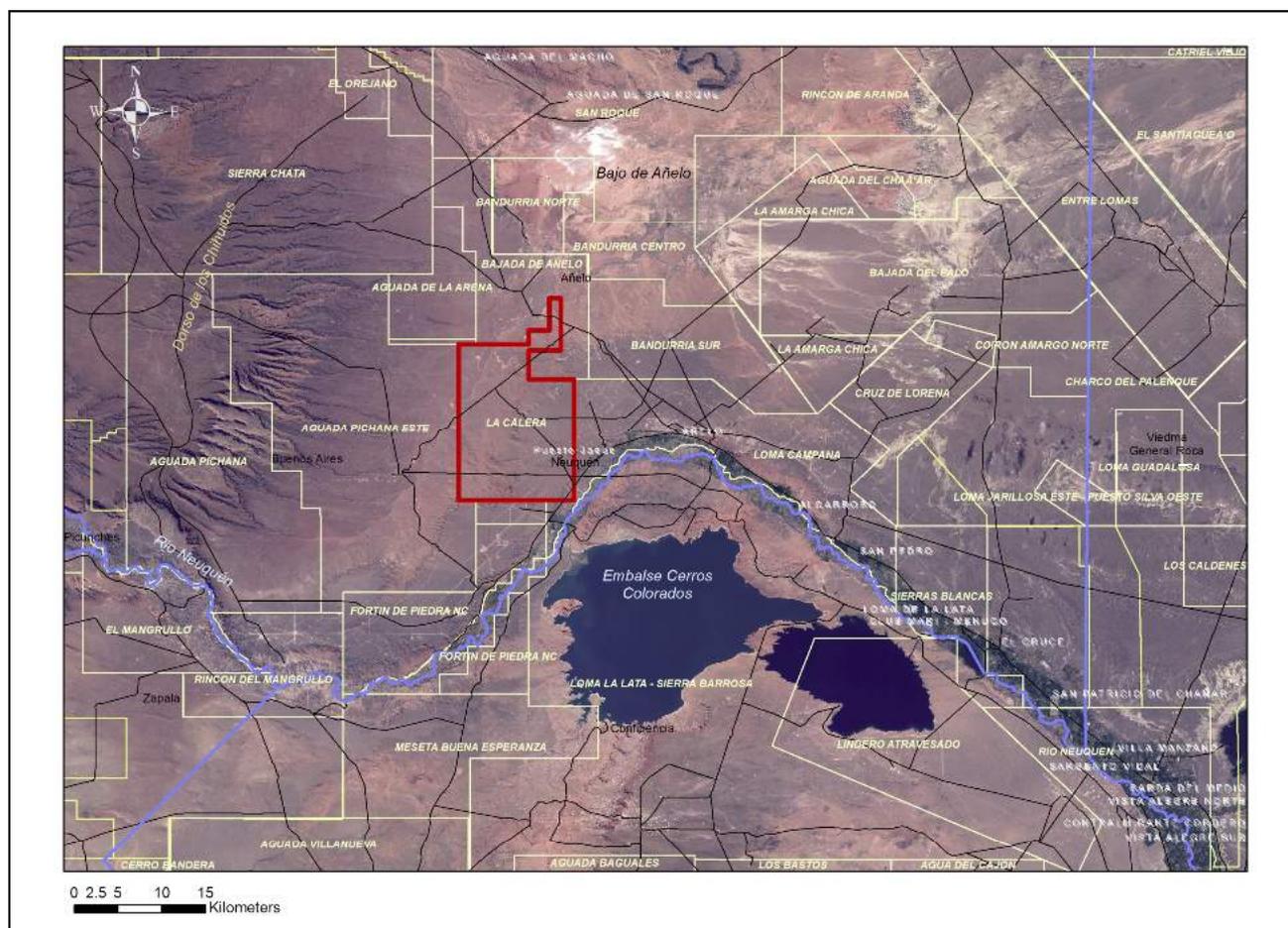


Figura 1. Ubicación regional del bloque La Calera y su relación respecto a los principales rasgos geomorfológicas de la región.

condicionadas por el diseño de las cuencas hídricas superficiales (Figura 2). El bloque La Calera se encuentra en la **Región Noreste** (2). Si bien la zona fue poco estudiada en el pasado, el desarrollo de los yacimientos no convencionales y el consecuente incremento de la actividad hidrocarburífera han permitido aumentar el conocimiento técnico de la región. En los últimos años se iniciaron diferentes trabajos de correlación estratigráfica donde muchas de sus unidades corresponden a niveles acuíferos y acuitados de carácter regional. Identificar estos niveles, permitió su caracterización hidroquímica e hidráulica, a partir de la realización de mediciones y muestreos in situ. Dado el creciente interés por el desarrollo de recursos no convencionales, y los grandes volúmenes requeridos para esta actividad, se generó la necesidad de establecer un marco de referencia para la protección de los acuíferos. El cual se describe a continuación.

La SsRH (Subsecretaría de Recursos Hídricos) de la provincia de Neuquén, dentro del marco de las reuniones bimensuales de correlación, donde participan todas las empresas operadoras de la cuenca, estableció los criterios que deben considerarse con el fin de proteger los acuíferos, siendo los mismos:

- I Asegurar un espesor mínimo de protección de 100 metros de arenas saturadas en agua, pudiendo considerarse múltiples intervalos acuíferos.
- II Ubicar el zapato de la cañería guía en un intervalo definido como sello hidráulico (local o regional).
- III Caracterizar hidroquímicamente las aguas presentes en el subsuelo y determinar su aptitud para consumo humano y/o irrigación.

#### OBJETIVOS

Presentar la secuencia de trabajo utilizada para la realización de un Estudio Hidrogeológico Integral en zonas con actividad hidrocarburífera.

Integrar el bloque La Calera dentro de un marco hidrogeológico regional y conocer las características de los diferentes niveles acuíferos del área.

Enmarcar el recurso hídrico en los requerimientos de la SsRH de la provincia de Neuquén y las legislaciones vigentes.

Optimizar el diseño de cañerías de superficie en la perforación de pozos hidrocarburíferos, con el fin de asegurar la aislación de los niveles acuíferos que requieran protección.

#### METODOLOGÍA

La secuencia de trabajo fue completada siguiendo 3 tres etapas definidas por el grado de conocimiento del bloque.

**Etapla 1. Estudio hidrogeológico regional:** Se trata de una recopilación y análisis de antecedentes regionales del medio físico (Clima, Hidrología, Geomorfología, Geología). Esta etapa contempla una caracterización de subsuelo en base a datos pre-existentes de perfiles, legajos de pozo e informes regionales. Se busca además realizar una primera estimación de las salinidades presentes en el subsuelo a partir de la interpretación de perfiles eléctricos.

**Etapla 2. Integración de datos y antecedentes regionales:** Se incorporó la información del repositorio virtual generado por la SsRH de la provincia de Neuquén. Esta información incluye ubicación de pozos, perfiles, correlaciones estratigráficas (algunas con respaldo sísmico), identificación de niveles acuífero, niveles sello, análisis químicos de agua, puntos de presión, etc.

**Etapla 3. Ajuste del modelo hidrogeológico e hidroquímico con la información obtenida de nuevos pozos del bloque:** En esta etapa se incorporan los datos hidroquímicos e hidráulicos obtenidos mediante el muestreo de diferentes niveles acuíferos. Se realiza una clasificación de familias hidroquímicas de agua y aptitud para consumo y/o riego, siguiendo el protocolo de análisis descripto en *Rodriguez et al (2020)*, el cual cumple los requerimientos de la autoridad provincial.

#### Etapla 1: Estudio Hidrogeológico Regional

Durante 2017, se perforó en el área La Calera, el primer pozo exploratorio a la Formación Vaca Muerta, cuyos resultados productivos dieron lugar a solicitar una concesión de explotación no convencional para toda el área. A fines del mismo año, con el objeto de llevar adelante la perforación de un plan piloto de 9 pozos e incrementar el conocimiento del bloque, se decidió realizar un trabajo de caracterización hidrogeológica preliminar que estudie las características del medio físico (clima, hidrología, geología, geomorfología e hidrogeología) y su entorno, buscando además incrementar el conocimiento de los acuíferos presentes en la zona. Para ello se trabajó con información de perfiles de pozos del bloque, buscando reconocer aquellos niveles cuya respuesta eléctrica indicaba probable presencia de agua dulce.

Dentro del marco medio ambiental que presentó este estudio se puede mencionar que el clima de la provincia de Neuquén se caracteriza por un alto grado de continentalidad. Según la calificación de Köppen corresponde a un clima seco, desértico y frío (BWk), influenciado por la cordillera de los Andes. El gradiente de precipitaciones disminuye de Oeste a Este entre valores promedios de 1500 a 150 mm/a (*Hidroar SA, 2017*).

El análisis de hidrología superficial permite definir que la mayor parte de la escorrentía superficial de la provincia de Neuquén drena hacia el océano Atlántico por medio de los ríos Neuquén, Limay y Colorado; mientras que una superficie menor, en el sector suroeste, drena al Pacífico. En la zona central de la provincia, procesos de inversión de relieve han generado una subcuenca de tipo endorreica que cubre una superficie aproximada de 9350 km<sup>2</sup>, la subcuenca Bajo de Añelo. (Figura 3)

El Río Neuquén representa el principal curso de agua de la región. Nace en el sector cordillerano, (1470msnm), y recorre poco más de 400 Km donde confluye con el Río Limay para formar el Río Negro (250msnm). Desde el punto de vista de su relación con el subsuelo, es un río influente.

El bloque La Calera presenta un clima árido de escasas precipitaciones. La temperatura media anual es de 15°C, con marcado patrón estacional. Las precipitaciones medias anuales son 150mm/a, y el viento es uno de los factores climáticos más importantes. Se ubica casi en su totalidad dentro de la subcuenca del Bajo de Añelo, aunque su sector sureste está vinculado a la cuenca del Río Neuquén. La divisoria de aguas la constituye la Planicie de Añelo, de orientación este-oeste. Geomorfológicamente la zona se encuentra en el sector sur del Bajo de Añelo y está limitado al oeste por el Dorso de los Chihuidos, rasgo morfoestructural positivo terciario que afecta a toda la columna sedimentaria. Este alto conforma una importante zona de erosión donde aflora la formación Rayoso, definiendo así una zona de recarga local del acuífero. El área de estudio se caracteriza por presentar un paisaje de tipo mesetiforme, interrumpido por valles fluviales y delimitado por escarpas erosivas o "Bardas". El modelado del relieve alude a procesos fluviales y, en menor medida, eólicos y de remoción en masa. Las unidades geomorfológicas que se reconocen corresponden principalmente a

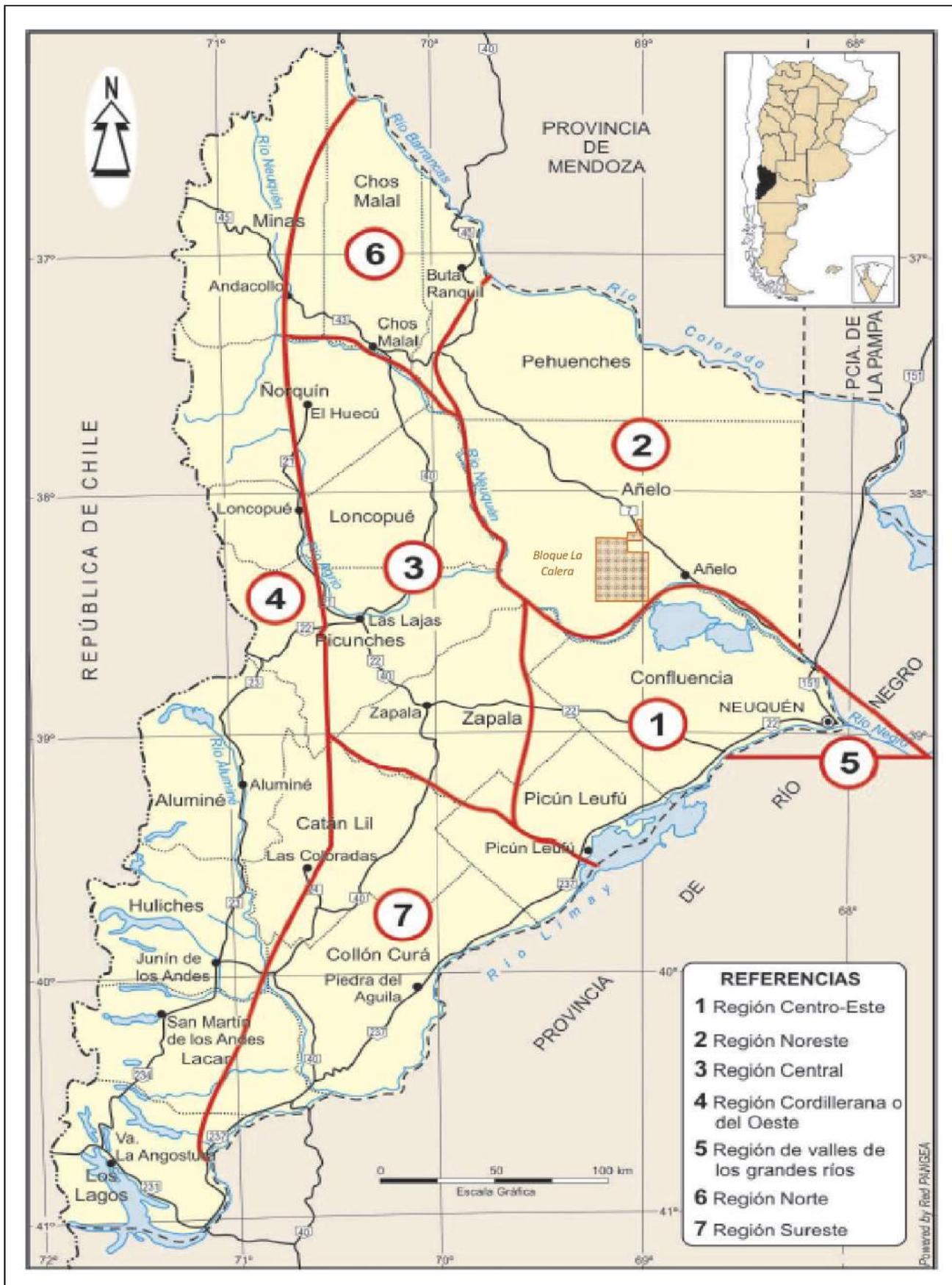


Figura 2. Ubicación regional del bloque La Calera y su relación respecto a los principales rasgos geomorfológicos de la región.

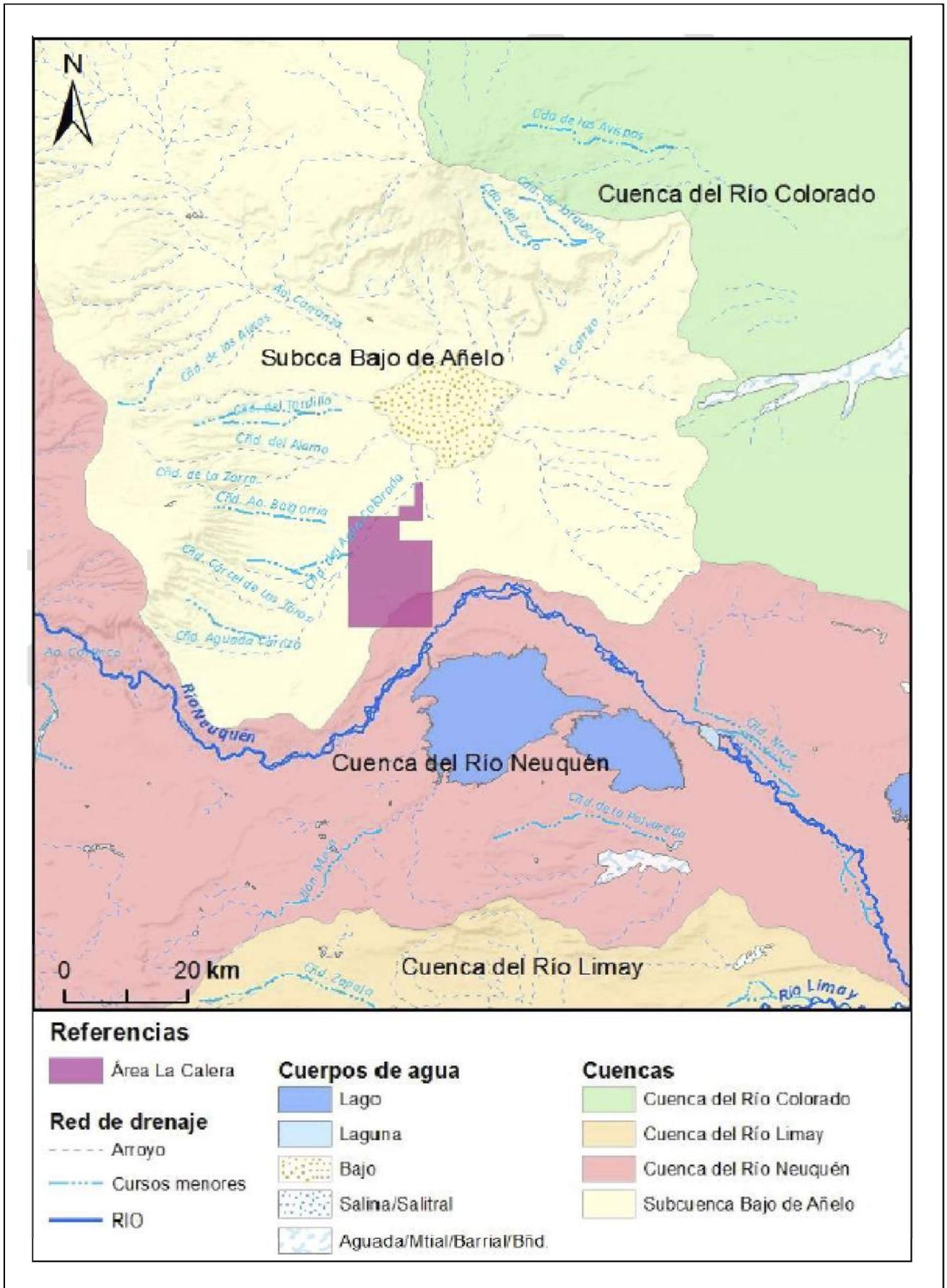


Figura 3. Hidrología de la provincia de Neuquén en las inmediaciones de la zona de estudio.

terrazas fluviales, planicies y abanicos aluviales, y geoformas eólicas cuaternarias.

Con el fin de tener una primera aproximación de las características litológicas de los potenciales niveles acuíferos, se describen las características de la Formación Rayoso y del Grupo Neuquén

La Formación Rayoso se compone de sedimentitas clásticas de origen fluvial. Este conjunto es cubierto en discordancia angular por depósitos continentales del Grupo Neuquén. Estas unidades alcanzan en conjunto un espesor máximo de 1000 m al Este del bloque La Calera, donde aflora la Formación Cerro Lisandro.

Hacia el oeste, el espesor disminuye progresivamente producto de la influencia del Dorso de los Chihuidos. Todos estos

depósitos están parcialmente cubiertos en parte por sedimentos cuaternarios.

Se analizaron e interpretaron los perfiles de los pozos del yacimiento La Calera y se confeccionaron secciones y mapas estructurales.

Las correlaciones realizadas permiten evaluar la disposición de las formaciones en subsuelo que, sumado a la litología identificada, permite tener una interpretación inicial de las diferentes unidades hidrogeológicas presentes (acuíferos, acuitardos, acuícidos).

La caracterización hidrogeológica inicial (Etapa I), permitió identificar distintos niveles acuíferos en posiciones someras y profundas. El trabajo estuvo basado en la interpretación de perfiles eléctricos, ya que durante esta etapa no se contaba con muestreos de agua ni análisis químicos que validaran las estimaciones petrofísicas (Figura 4).

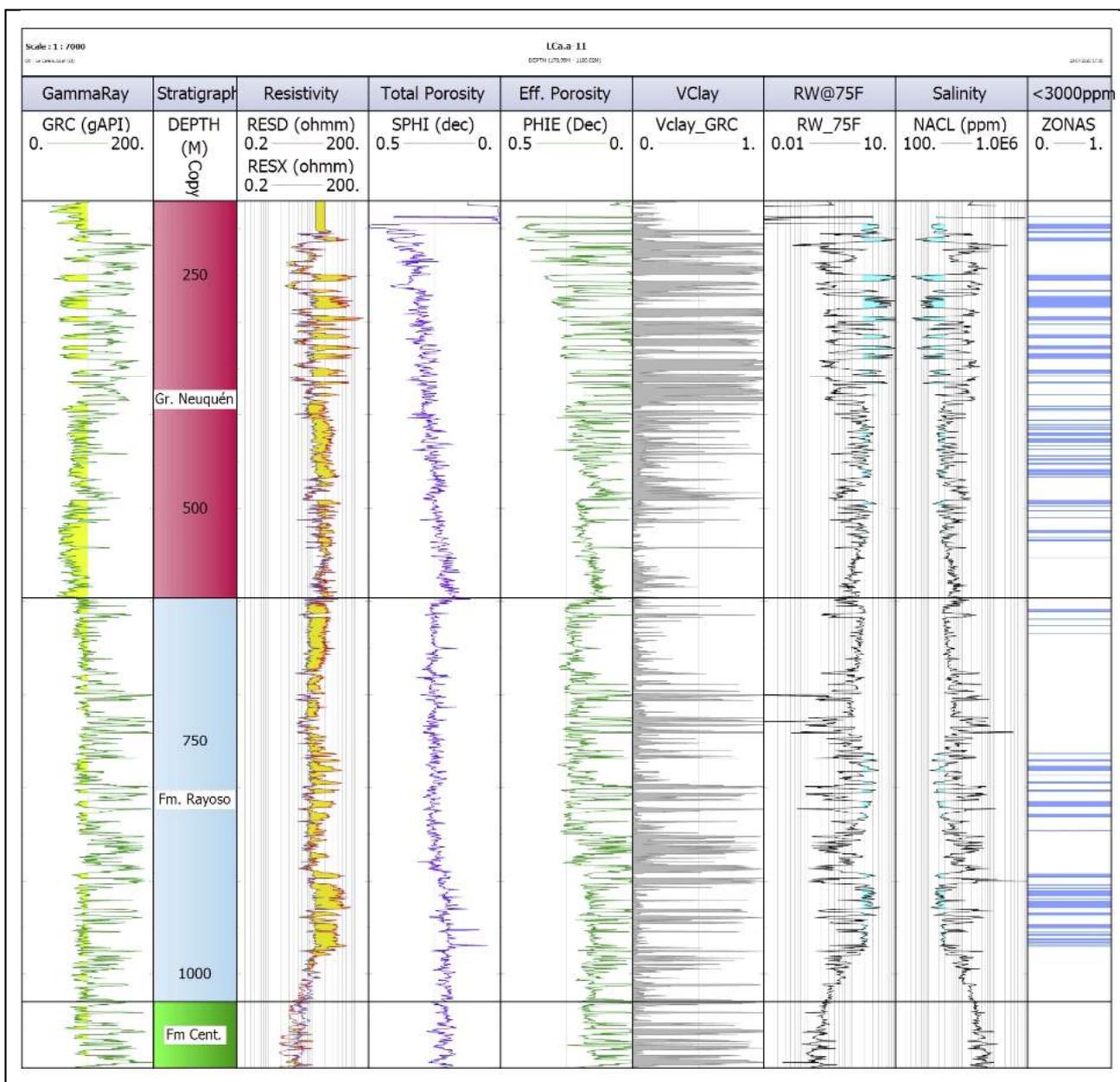


Figura 4. Análisis petrofísico del pozo LCa.a-11. Cálculo de porosidad, salinidad y volumen de arcillas. Identificación de niveles con agua menor a 3000 ppm.

Los resultados principales de la Etapa I fueron los siguientes:

- El clima del área es seco, desértico y frío, con una temperatura media anual de 15°C, precipitaciones de 150 mm/año, y viento intenso del oeste y sudoeste.
- El bloque se ubica casi en su totalidad dentro de la subcuenca del Bajo de Añelo. Su sector sureste está vinculado a la cuenca del Río Neuquén.
- La presencia del río Neuquén y el embalse Cerros Colorados, hacia el sur del bloque, podrían conformar zonas de aporte al medio subterráneo.
- Los potenciales intervalos acuíferos se encuentran asociados a los depósitos del Grupo Neuquén y la Formación Rayoso.
- Mediante el análisis petrofísico se determinaron de manera indirecta los intervalos acuíferos con salinidad menor a 3000 ppm de STD.

Las técnicas de caracterización petrofísica implementadas en este trabajo tienen las siguientes características. (Alonso, 2016 y Patten & Bennett, 1963).

- Son cálculos surgidos del estudio petrolero, generalmente asociado a reservorios profundos con altas salinidades (>30000 ppm). Su extrapolación a los acuíferos más

someros (y de menor salinidad) requiere disponer de muestras para su comparación y calibración.

La transformación de la resistividad del agua ( $R_w$ ) calculada por perfiles, a valores de salinidad, se obtiene a partir de ábacos y fórmulas que consideran al NaCl equivalente como sal constituyente de la solución. Sin embargo, en los sistemas acuíferos con presencia de agua dulce, participan en su composición otros iones ( $SO_4$ ,  $HCO_3$ , Ca, Na, Mg, etc), que incluso pueden ser más abundantes que el NaCl, y pueden convertir el agua dulce en no potable, o no apta para riego.

## Etapa 2: Integración con Información Regional (Repositorio digital SsRH)

Con el Estudio Hidrogeológico Regional de base (Etapa I) y con el fin de ajustar la caracterización de los acuíferos presentes en el Grupo Neuquén y la Formación Rayoso, se incorporó la información pública compartida por otras operadoras de la cuenca, disponible en el repositorio digital generado por la SsRH de la provincia de Neuquén, de acceso libre para las empresas participantes. Esta información permitió contar con registros eléctricos e información de muestras de laboratorio de pozos aledaños al área La Calera, lo que permitió incluirla en un contexto regional (Figura 5).

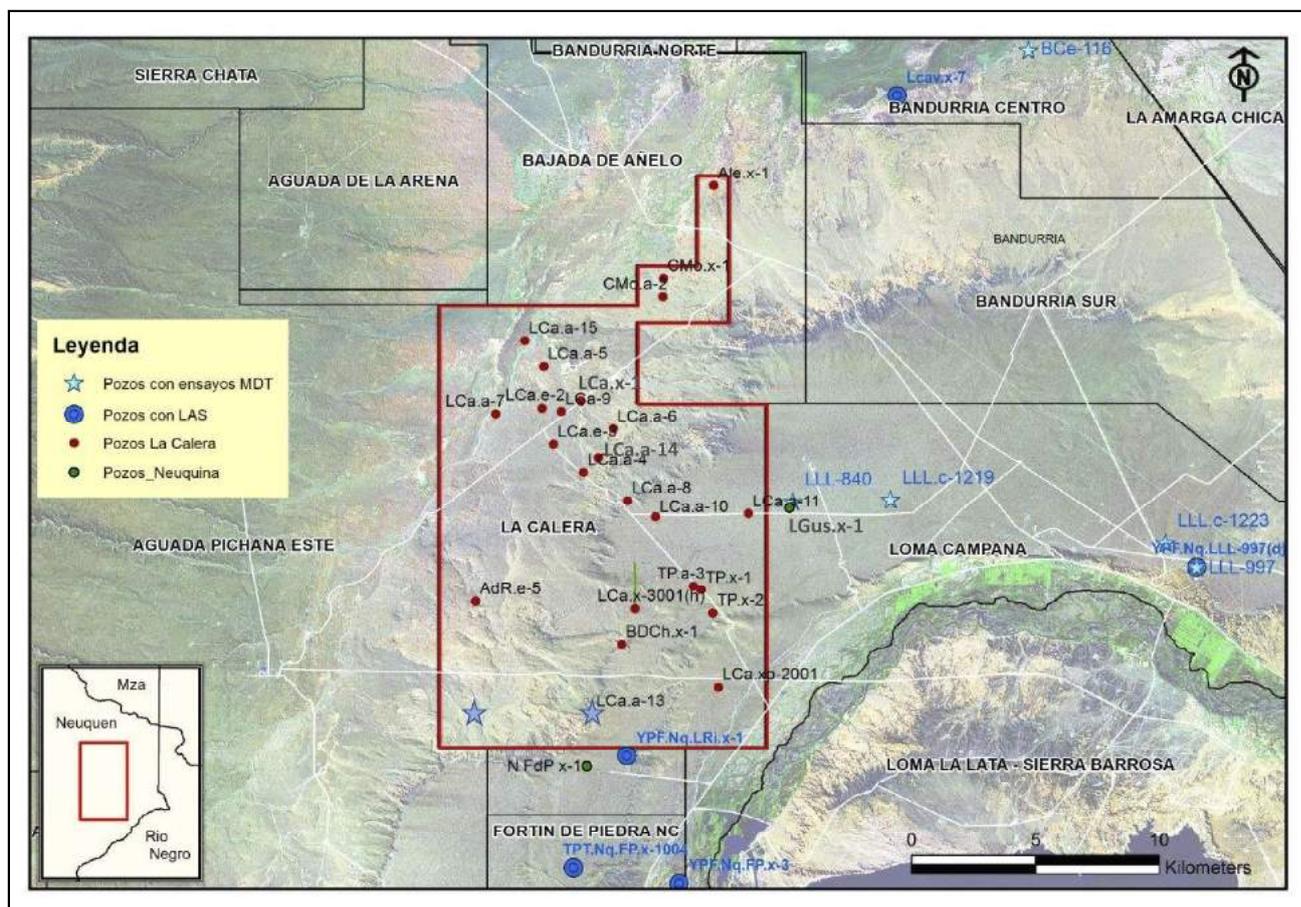


Figura 5. Mapa de Ubicación del Bloque La Calera. Se detalla la información disponible a nivel local y regional.

## INTEGRACIÓN REGIONAL DE SUBSUELO

Se realizó una integración geológica regional con las áreas vecinas, verificando la presencia y continuidad de las unidades geológicas, sus características petrofísicas, definición de niveles sello y características de sus aguas. Se generaron dos secciones estratigráficas que incluyen pozos de las áreas de Loma Campana, La Calera y La Ribera, donde se comprueba la continuidad lateral de las unidades (Figura 6). Estas correlaciones estuvieron sustentadas con secciones sísmicas (Figura 7).

Con el fin de profundizar el estudio, se definieron 4 unidades dentro de la formación. Rayoso (Nivel 1,2,3 y 4), las cuales pueden corresponder a niveles acuíferos de distintas características. Además, su continuidad sísmica permitió extrapolarlos a las áreas vecinas e integrar estos niveles regionalmente.

Respecto al Grupo Neuquén, se logró reconocer en su base un intervalo estratigráfico de espesor constante ( $\pm 140m$ ), de bajo GR y resistividades con invasión nula, que corresponden a la formación Candeleros. Estudios sobre cutting y en afloramiento denotan un alto grado de cementación de estos depósitos que le confieren características de sello regional. Desde una visión hidrogeológica constituye un *Acuícludo*, mostrando como evidencia ensayos sin entrada (dry tests) en pruebas realizadas en el área de Loma Campana.

Se replicó para los pozos de las áreas vecinas la construcción de una curva de salinidad, tal como se había realizado para los pozos del bloque La Calera en la Etapa I. Con ello se determinó que el Grupo Neuquén y la Formación Rayoso, presentan salinidades entre 1000 y 5000 ppm de NaCl, mientras que en la Formación Centenario poseen salinidades que superan los 30000 ppm. Mediciones realizadas sobre muestras de agua obtenidas en pozos de Loma Campana indican que las estimaciones

de salinidad realizadas con perfiles son coherentes con los resultados obtenidos en laboratorio. Este trabajo identificó y definió una zona “de transición” (nivel 4) en un intervalo de poco espesor ( $\pm 35m$ ) donde la salinidad se eleva en forma abrupta, desde los 3500 a los 30000ppm, interpretándose como un sello hidráulico regional (Acuitardo) que separa los niveles acuíferos de la Formación Rayoso, de los correspondientes a la Formación Centenario. (Figura 8).

Con los datos de muestras de áreas vecinas y el análisis de datos indirectos de La Calera, se pudo realizar un gráfico resumen con diferentes niveles acuíferos y niveles de sello. (Figura 9).

Los resultados principales de la ETAPA 2 son:

- La correlación con pozos de áreas vecinas verifico la presencia y continuidad de los principales intervalos definidos en este trabajo y de uso en el ámbito de las reuniones bimensuales. Se identificaron nuevos niveles internos de la Formación Rayoso (niveles 1, 2 3 y 4).
- Se confirmó la presencia de la Formación Candeleros, importante sello regional de la base del Grupo Neuquén.
- Basado en la correlación estratigráfica con los bloques vecinos, se asignaron salinidades de los diferentes niveles acuíferos.
- Se definió una zona “de transición” de salinidades (acuitardo) de unos 35m de espesor, en la base de la Formación Rayoso.
- Esta zona presenta una transición de salinidades entre los 3500 ppm de salinidad en la base de Formación Rayoso, a los 30000 ppm al techo de la Formación Centenario.

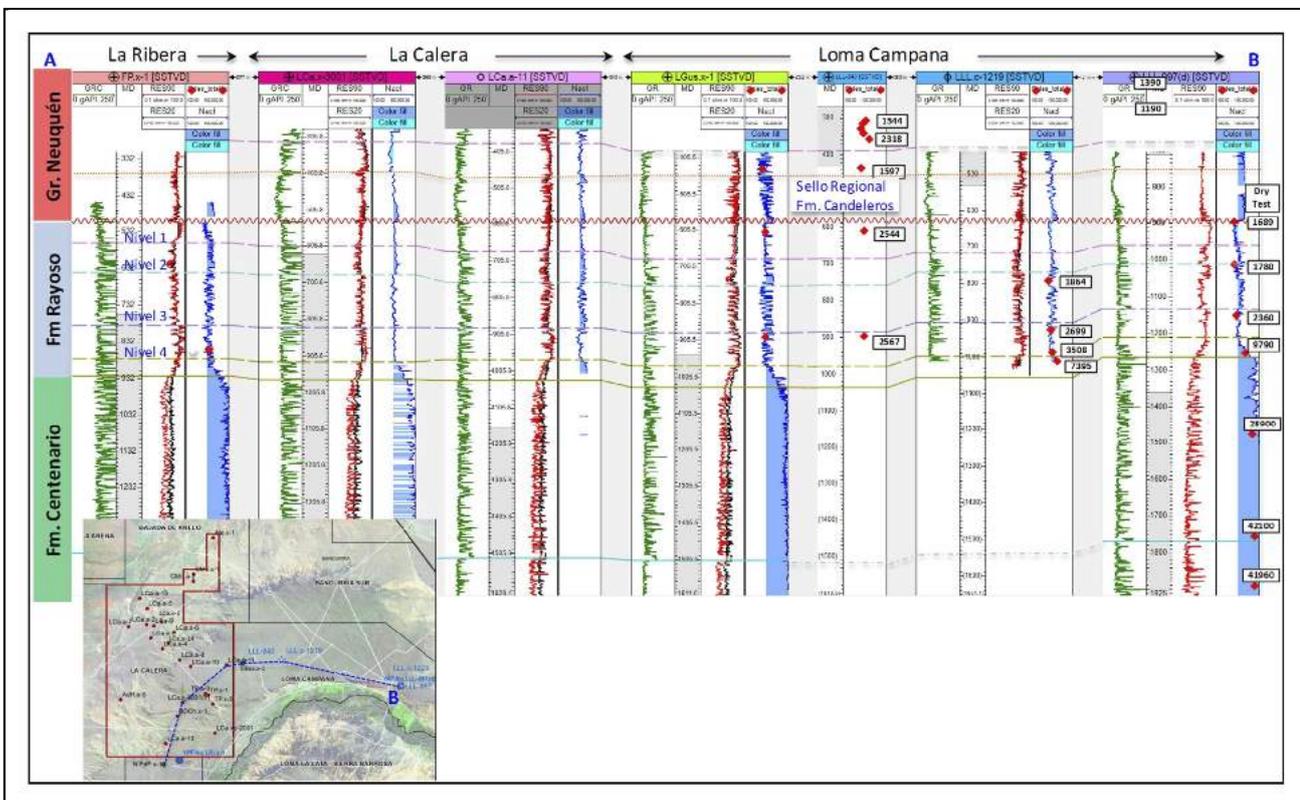


Figura 6. Correlación regional entre pozos de La Ribera, La Calera y Loma Campana.

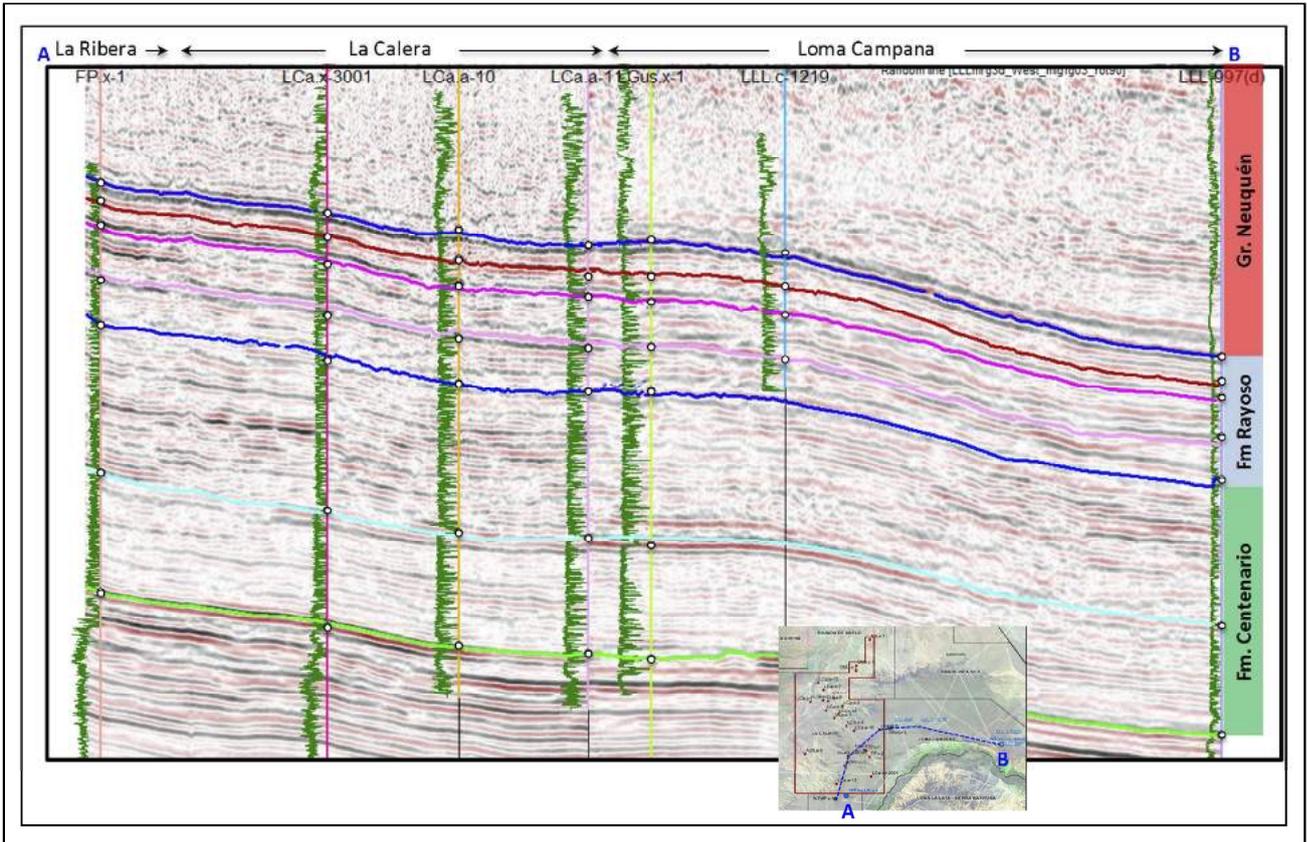


Figura 7. Sección sísmica integrando pozos de La Ribera, La Calera y Loma Campana.

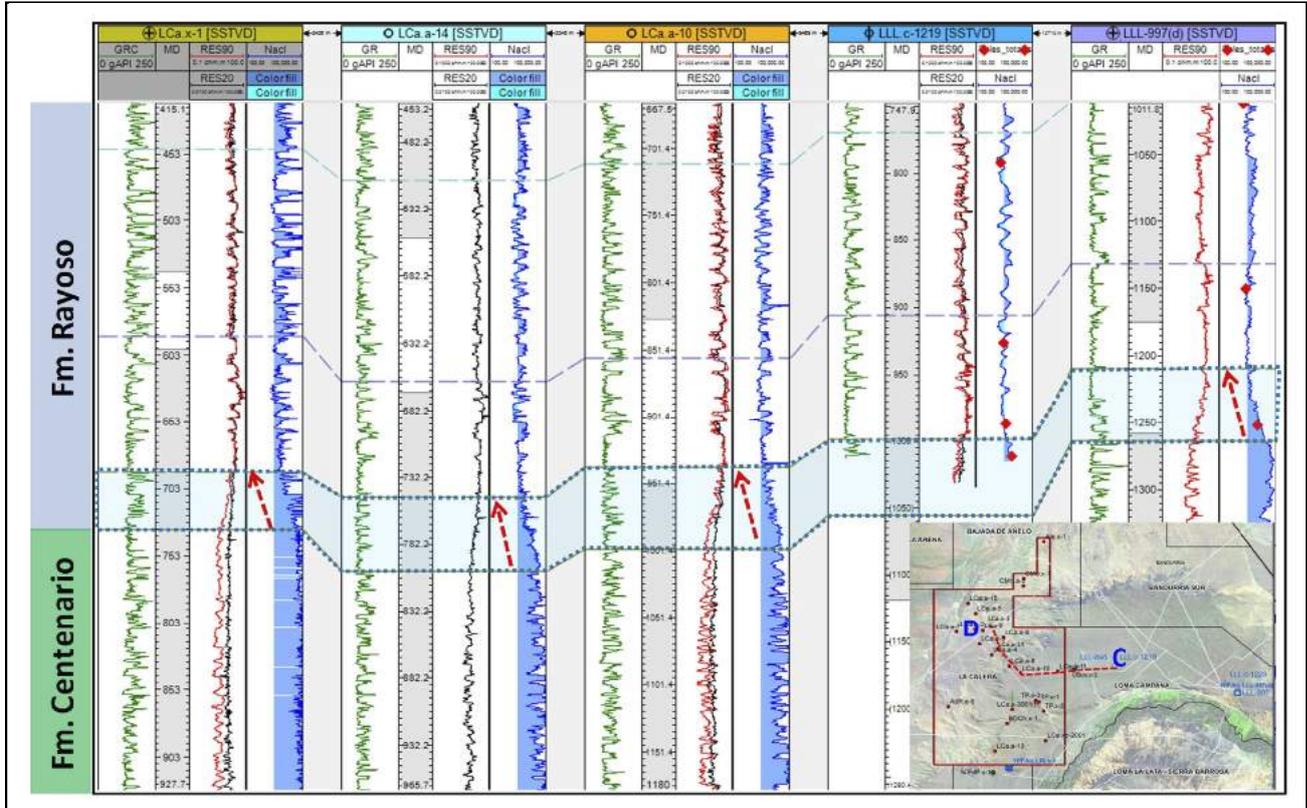


Figura 8. Correlación estratigráfica entre pozos La Calera - Loma Campana. El sector sombreado delimita la zona de transición de salinidad definida en el texto. La flecha roja indica la rampa de salinidad que hay entre la base de Fm Rayoso - Fm Centenario. Los puntos rojos corresponden a los valores de STD en muestras de agua tomadas en pozo. Nótese la buena correlación con la curva de salinidad calculada por perfiles.

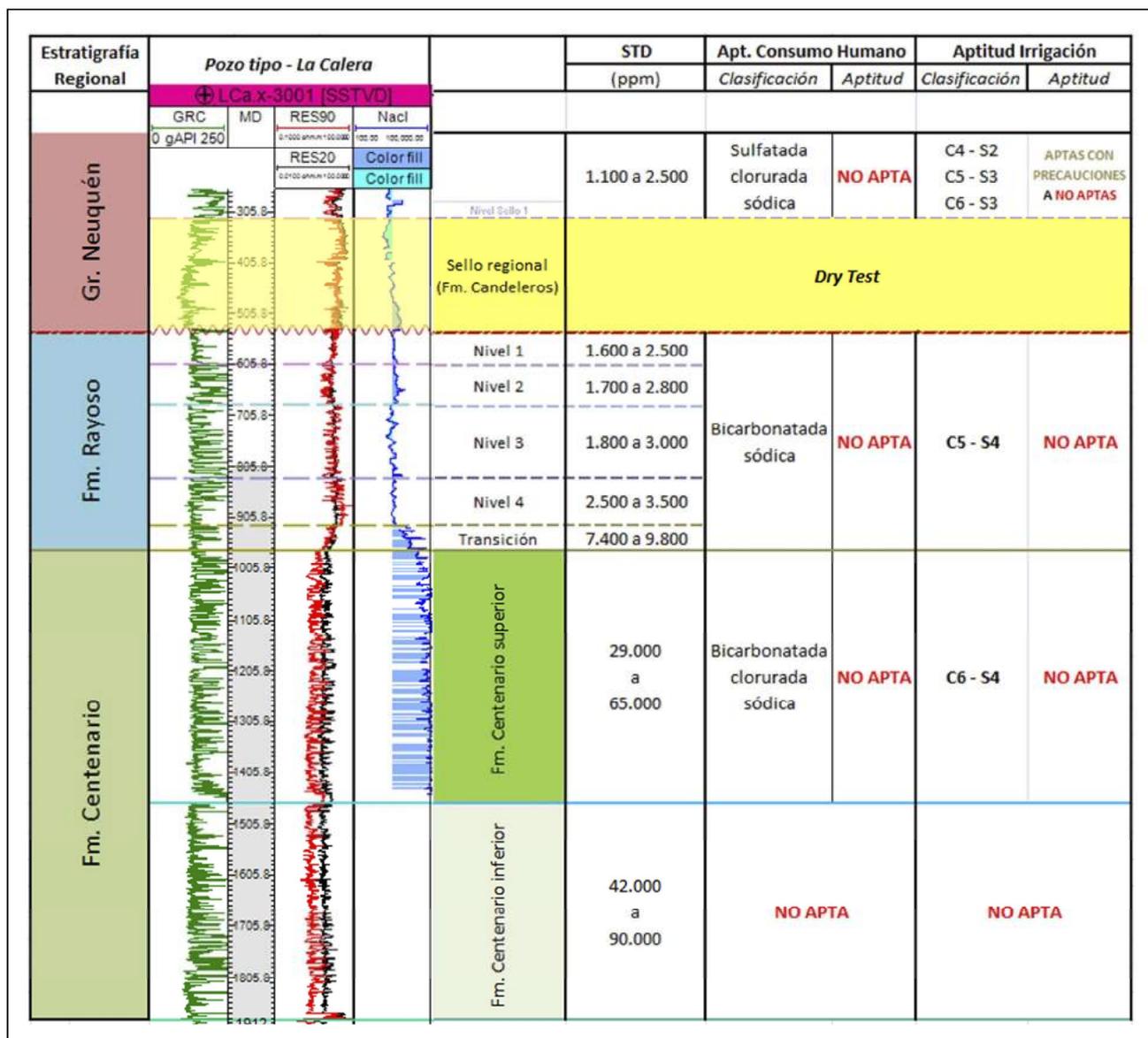


Figura 9. Cuadro resumen de las características de los acuíferos en el área La Calera, basado en correlación de pozos.

**Etapas 3: Ajuste del modelo hidrogeológico e hidroquímico con la información de pozo.**

Con el Estudio Hidrogeológico Regional (Etapa I) ajustado con los datos de pozos de bloques vecinos (Etapa II), se diseñó el plan de toma de muestras en La Calera. El programa contempló correr un set de perfiles de pozo que incluyó GR-IND-Sónico, y la toma de muestras de agua y presiones de formación. Una vez obtenida esta información se comenzó a trabajar en la calibración del trabajo realizado en la Etapa I y II.

Para la caracterización hidrogeológica se tomaron muestras de agua del Grupo Neuquén, Formación Rayoso y de la Formación Centenario. También fueron medidas las presiones de formación en diferentes niveles, con el fin de obtener datos que permitan estimar la posición del nivel estático del agua y confirmar los niveles sellos. Los pozos muestreados fueron: LCa-3008(h), LCa.a-3011, LCa.s-3025 y LCa.a-3107 (Figura 10).

El muestreo y los análisis químicos se realizaron siguiendo los principios y procedimientos definidos en Rodríguez et al (2020). La clasificación en familias de agua se realizó siguiendo

el método gráfico de Piper (1944). Estas muestras también fueron clasificadas según el Código Alimentario Argentino (CAA) para definir su potabilidad, y finalmente se define su calidad como agua para riego, según la norma Riverside (RAS - relación de absorción de sodio).

Los resultados de STD observados en los pozos de La Calera, presentan un perfil de salinidad variable entre 850 y 5000 ppm. En la base de la Formación Rayoso, la salinidad comienza a mostrar un aumento progresivo desde 3500 ppm, hasta 18000 ppm, comprobando la zona “de transición” de salinidad definida en la Etapa II.

Dentro del bloque La Calera, el Grupo Neuquén presenta 3 intervalos (Figura 10).

- 1° zona no saturada-ZNS (entre el nivel del terreno y el nivel estático-NE),
- 2° zona saturada ZS (entre el NE y el techo de la Formación Candeleros). Este intervalo conforma una de los objetivos a proteger.

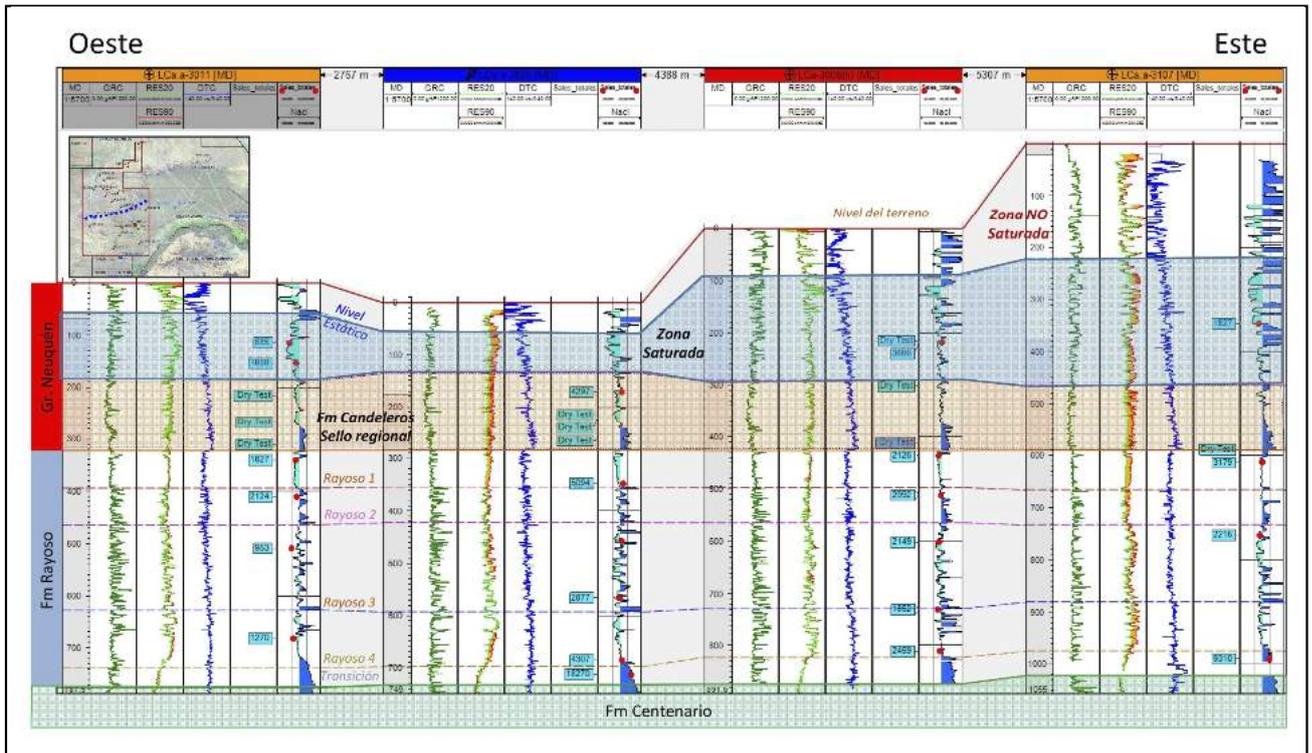


Figura 10. Correlación Oeste- Este en La Calera. Pozos LCa.a-3011-LCa.s3025-LCa-3008-LCa.a-3107.

3° Sello Regional SR: definido por la Formación Candeleros, nivel sello regional.

**CLASIFICACIÓN HIDROQUÍMICA**

Según la clasificación de Piper (1944) se pudo comprobar que todas las muestras analizadas del bloque La Calera (Grupo Neuquén y Formación Rayoso) corresponden a familias del tipo

Cloruradas y/o Sulfatadas sódicas (Figura 11). Los STD varían entre 680 ppm (Grupo Neuquén) y 5000 ppm (Formación Rayoso). Estas características químicas permiten ubicar a los acuíferos en una zona de transporte ya que por su concentración salina corresponden a aguas salobres La confirmación de estas interpretaciones requiere análisis isotópicos, y esta temática no será abordada en este estudio.

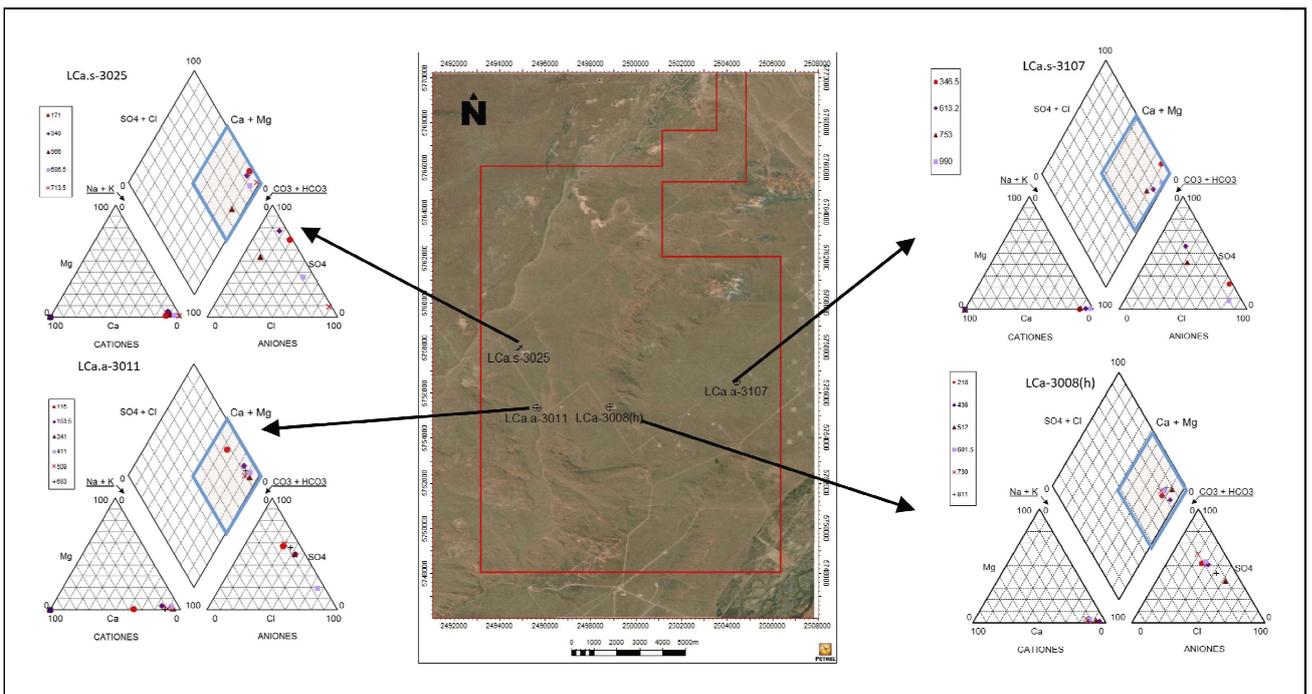


Figura 11. Clasificación en Familias de Agua - Diagrama de Piper. Pozos LCa.a-3011-LCa.s3025-LCa-3008-LCa.a-3107.

### CLASIFICACIÓN SEGÚN APTITUD PARA RIEGO

Para clasificar el agua según su aptitud para riego se utilizaron las normas Riverside (*US Salinity Laboratory Staff, 1954*), dónde la calidad química de las aguas destinadas a riego toma en consideración tres aspectos principales:

- Peligro de salinización de los suelos
- Peligro de sodificación de los suelos
- Peligro de Toxicidad específica

$$RAS = \frac{Na}{\sqrt{(Ca + Mg)/2}}$$

Donde RAS: Relación de Adsorción de Sodio

Na: Concentración de ion Sodio (+1) en meq/l

Ca: Concentración de ion Calcio (+2) en meq/l

Mg: Concentración de ion Magnesio (+2) en meq/l

De esta clasificación se concluye que casi la totalidad de las muestras (Grupo Neuquén y Formación Rayoso) tienen conductividad eléctrica regular a alta, en tanto que respecto a la Relación de Adsorción del Sodio (RAS) en general es muy alta. En su mayoría sus aguas NO son aptas para riego, solo en casos puntuales en muestras del Grupo Neuquén, algunas muestras se clasifican como aptas con precauciones (Figura 12)

Finalmente, analizando las muestras según el Código Alimentario Argentino (CAA), ninguna muestra de agua puede clasificarse como Potable. Si bien algunas presentan una salinidad total menor a los 1500 ppm (límite superior definido por el CAA), todas se encuentran excedidas en otros iones (como por ejemplo cloruros, sulfatos, bicarbonatos, Hierro total, entre otros).

### ANÁLISIS DEL AMBIENTE HIDROGEOLÓGICO REGIONAL

Para realizar una caracterización hidrogeológica regional que incluya el área La Calera, se realizó un corte topográfico - estructural esquemático, en sentido oeste - este, utilizando información de pozos, sísmica y afloramientos, con una extensión aproximada de 70 km (Figura 13).

Al oeste se encuentra una zona topográficamente más alta influenciada por el Dorso de los Chihuidos. Está definida por un terreno escarpado (zona conocida como Las Cárceres) donde aflora la Formación Candeleros, surcada por profundos valles que en su lecho alcanzan a la Formación Rayoso. Esta zona ya ha sido definida por *Alonso (2016)*. En este sector se encuentra la recarga de los acuíferos de la Formación Rayoso, los que tienen un claro sentido de circulación y transporte hacia el este. La recarga en el Grupo Neuquén es puntual y se concentra una vez que terminan los afloramientos de la Formación Candeleros, sector centro - este del bloque Aguada Pichana. (Figura 13). Para confirmar esta propuesta de flujo subterráneo del agua puede resultar de ayuda realizar algunas determinaciones de isotópicas, las que da una idea del tiempo de permanencia del agua en el subsuelo. Estos estudios ya son parte del protocolo de estudios requeridos por la SsRH. Uno de los primeros estudios isotópicos fue realizado en el bloque Lindero Atravesado, perteneciente a la compañía PAE.

Los acuíferos presentes en el subsuelo del bloque La Calera representa una zona de transporte. Para todo el perfil hidrogeológico sus aguas se clasifican como cloruradas y/o sulfatadas sódicas. En esta zona el nivel estático se encuentra prácticamente sub-horizontal.

En el sector este del corte, representado por el bloque Loma Campana se observan dos condiciones:

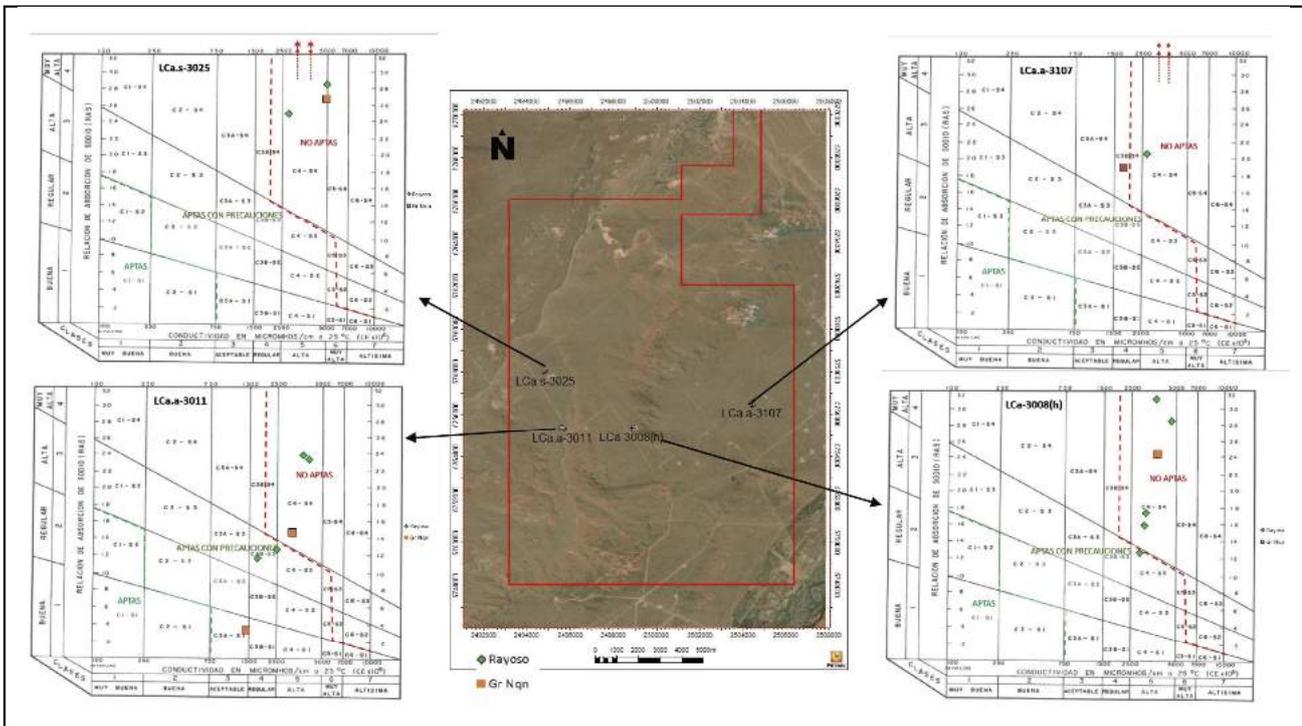
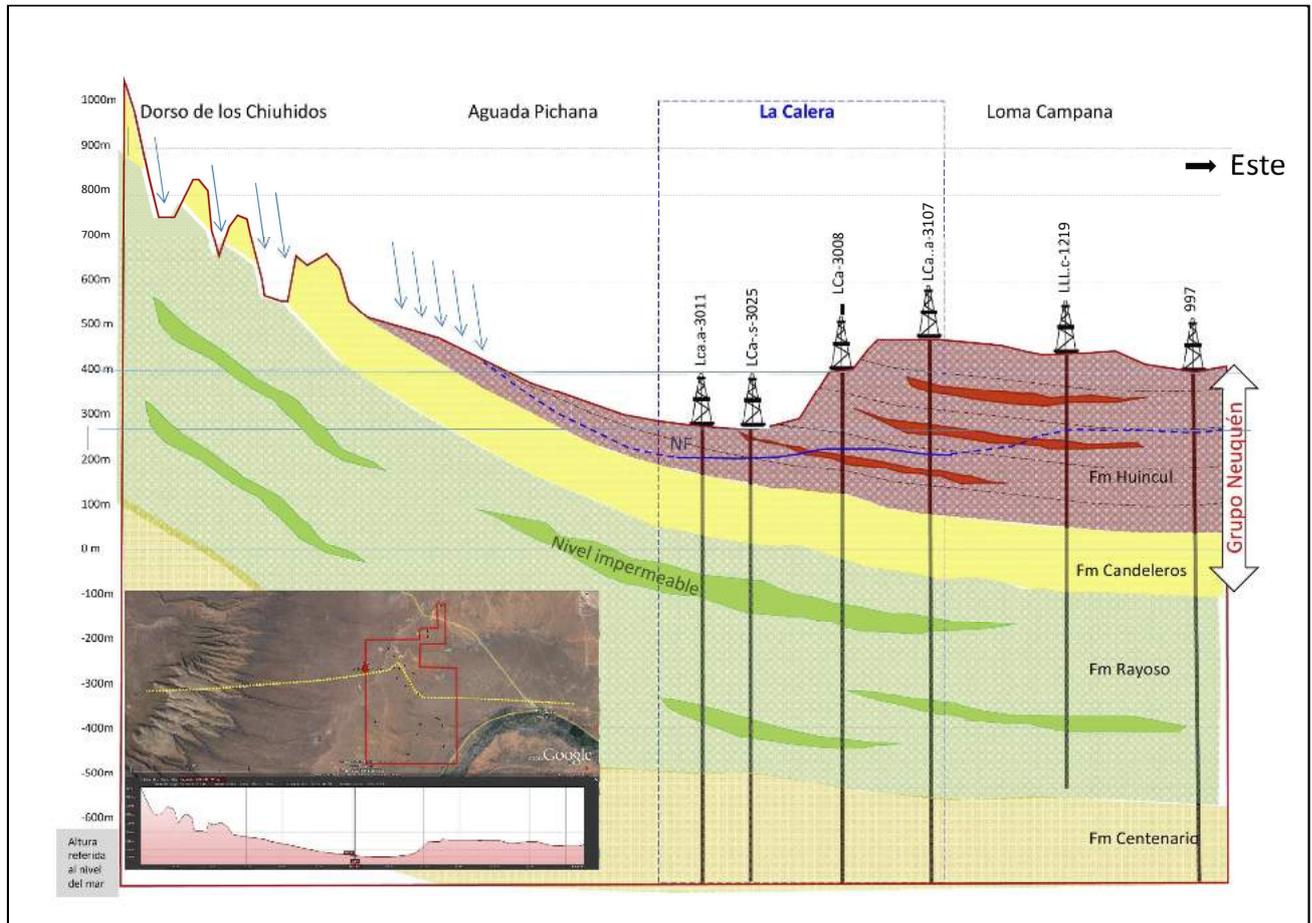


Figura 12. Grafico según las normas Riverside para evaluar la calidad de las aguas para riego (U.S. Solid Salinity Laboratory).



**Figura 13. Corte Topográfico - Estructural esquemático - oeste - este, incluyendo el Bloque La Calera. El nivel estático fue definido en base a los registros de presiones de pozo.**

- un ascenso en el nivel estático y,
- un cambio en la hidroquímica del agua,

Se evidencia hacia el este de la zona de estudio la presencia de aguas bicarbonatadas sódicas, que podría indicar condiciones de recarga cercana, las cuales estarían asociadas a los aportes del río Neuquén y el embalse Los Barreales.

#### PROTECCIÓN DE ACUÍFEROS

Las condiciones para la protección de acuíferos solicitadas por la SsRH de Neuquén tienen por objetivo asegurar los espesores mínimos de aislación de acuíferos, y las profundidades a partir de las cuales se podría perforar con lodo base petróleo (ÓBM). Los requerimientos son:

- La cañería guía debe cubrir al menos 100m de areniscas saturadas de agua y asentarse sobre un sello de extensión comprobada.
- Todos los acuíferos aptos para consumo humano y/o riego deben ser protegidos.
- Los niveles acuíferos contemplados en los 100m de arenas saturadas deben superar los 5m de espesor, o en su defecto, mostrar condiciones petrofísicas e hidráulicas que permitan su consideración.

Para comprender la situación del bloque La Calera, primero se determinó la profundidad del nivel estático del agua en los

4 pozos en los que se extrajeron datos (LCa-3008(h), LCa.a-3011, LCa.s-3025 y LCa.a-3107) Figura 14.

A partir de las presiones de formación tomadas, y la ausencia de sobrepresión en las capas, se puede ajustar una tendencia lineal que responde al gradiente hidráulico regional. Extrapolando dicho gradiente a presión atmosférica se logra obtener la posición del nivel freático, donde la recta intersecta el eje horizontal (profundidad vertical verdadera-TVD)

A continuación, se definió y extrapoló la ubicación de este nivel estático a los pozos del campo, de manera de poder tener identificada el límite superior de la zona saturada. Una vez identificada esta zona, se realizó un corte estratigráfico para conocer los espesores totales de la misma (Figura 15).

Una vez obtenido el espesor total de la zona saturada (Figura 15), se procede a calcular a través de técnicas petrofísicas el volumen de arcilla presente (VCLAY) (Figura 16). Calculándose luego la relación de espesores Net/Gross (espesor neto de arena/espesor total). Para La Calera se calculó una relación N/G promedio=0,7 para los niveles saturados suprayacentes a la formación Candeleros.

El mapeo del espesor total de la zona no saturada, evidenció una disminución del espesor total de la zona saturada hacia el oeste, debido a la presencia del Dorso de Los Chihuidos, hacia donde se reducen los espesores del grupo Neuquén, y aflora la Formación Candeleros. (Figura 17).

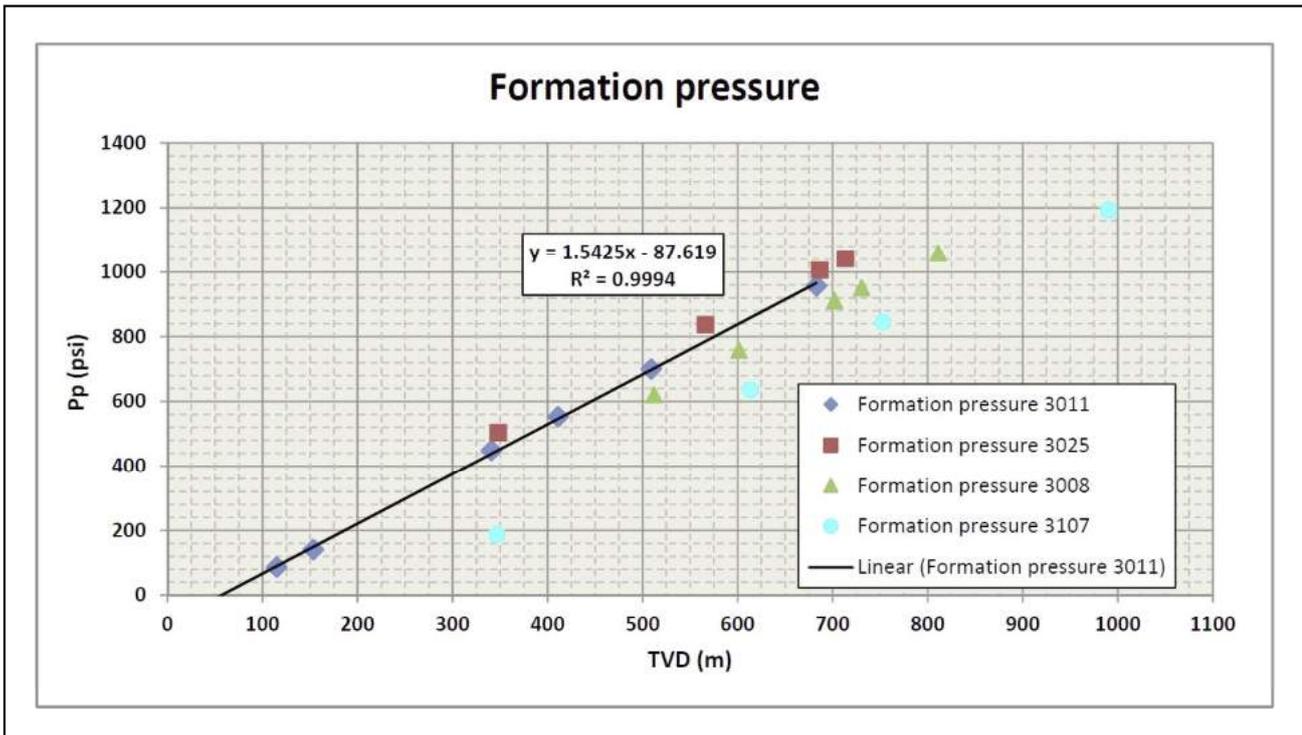


Figura 14. Gráfico P°Fm vs profundidad (TVD).

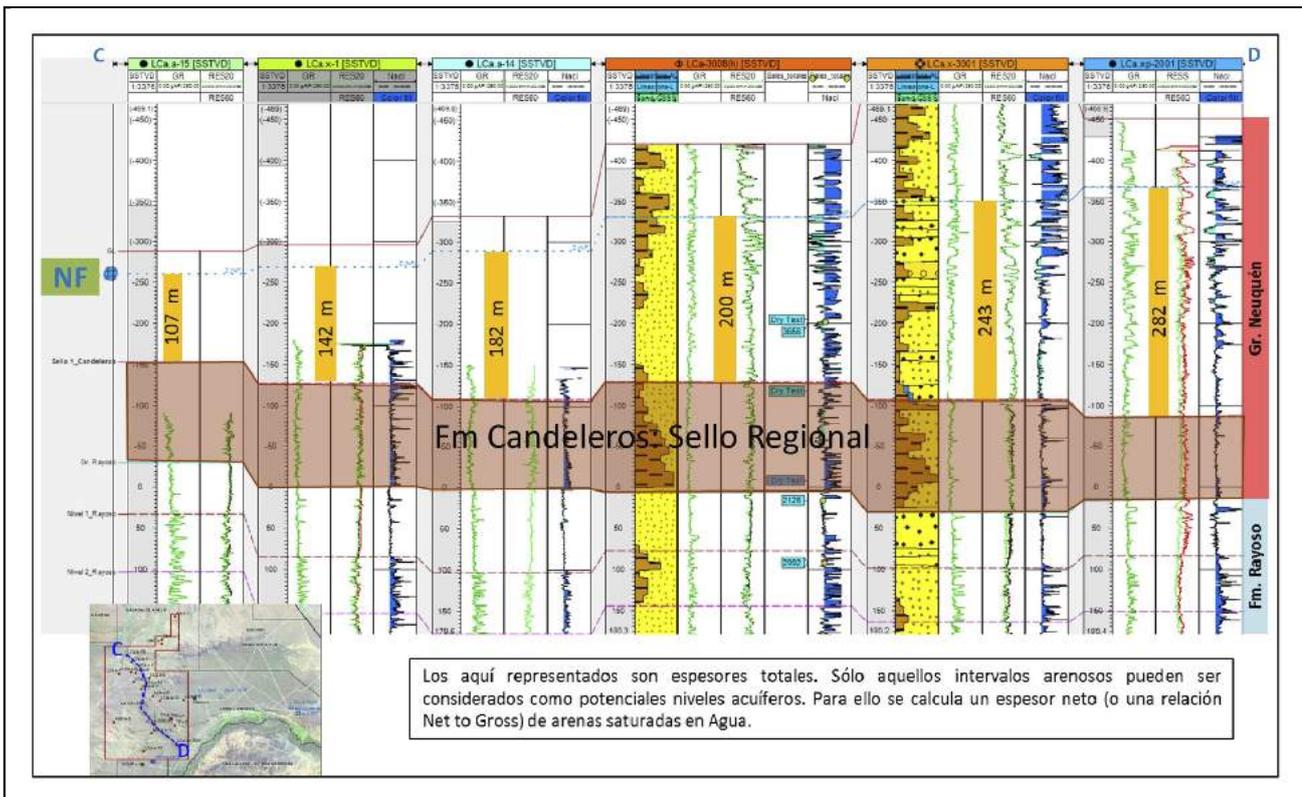


Figura 15. Correlación con definición de nivel estático y espesores de la Zona Saturada para Grupo Neuquén.

A partir de estos cálculos se realizó un mapa isopáquico del espesor suprayacente a la Formación Candeleros. Considerando la relación N/G obtenida, se definió una isópaca de 143m como indicadora de la posición que asegura la protección de 100m de arenas saturadas. Teniendo en cuenta el mapa hacia el este

de la isópaca 143m es válido asentar la cañería guía sobre la Formación Candeleros, mientras que hacia el oeste, se debe buscar otro nivel sello dentro de la Formación Rayoso. En este sentido la “zona de transición” en la base de la Formación Rayoso, podría actuar como nivel de asentamiento de la cañería guía.

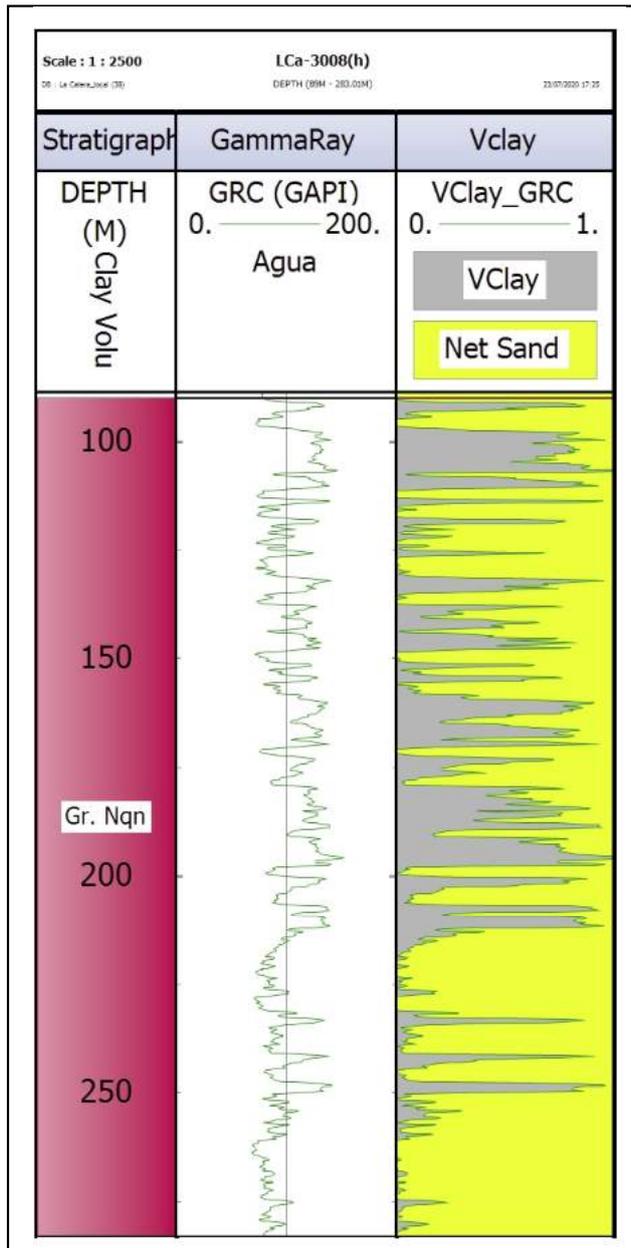


Figura 16. Cálculo de VCLAY y relación N/G para zona saturada.

A continuación, se listan los principales resultados de la Etapa 3:

- Las correlaciones de los niveles acuíferos presentan muy buena continuidad regional tanto a nivel litológico como hidroquímico.
- Siguiendo la tendencia regional, en La Calera, las muestras analizadas del Grupo Neuquén y Formación Rayoso no son aptas para consumo humano, ni para riego. Solo algunas muestras en la zona de acuíferos colgados en el Grupo Neuquén, se clasificaron como apto riego con precauciones.
- Según la clasificación de familias hidroquímicas, el Grupo Neuquén, la Formación Rayoso y la Formación Centenario poseen aguas Cloruradas y/o sulfatadas sódicas con algunas variaciones.

- Se determinó el espesor de la sección saturada suprayacente a la Formación Candeleros (Sello regional comprobado), la cual presenta una disminución en sentido este-oeste.
- Considerando la legislación vigente y según las técnicas presentes en las reuniones organizadas por la SsRH de la provincia de Neuquén se determinó una relación N/G promedio para toda el área de 0,7m. Esta relación se aplicó al mapa isopáquico de la sección suprayacente en la Formación Candeleros para asegurar la protección de 100m de arenas saturadas.

### CONSIDERACIONES FINALES

La secuencia de trabajo detallada presenta una hoja de ruta para el estudio, conocimiento y caracterización de la hidrogeología somera de los acuíferos presentes en la provincia de Neuquén. De igual forma, permitiendo generar un volumen de información, directa e indirecta que sirve de base tanto para el presente trabajo, como para futuros proyectos e investigaciones hidrogeológicas.

La posibilidad de poder contar con un repositorio digital de datos provisto por diferentes operadoras en otros sectores de la cuenca, representa sin duda un importante avance en el conocimiento y difusión de la hidrogeología neuquina. Sentando bases para trabajar de manera sostenible en el tiempo.

### PRINCIPALES CONCLUSIONES DEFINIDAS DEL ESTUDIO INTEGRAL DEL ÁREA LA CALERA

#### Etapa 1

Se caracterizó climáticamente al bloque, analizando las precipitaciones, temperaturas y vientos.

Se compilaron las principales características geológicas, geomorfológicas y de hidrología superficial del bloque, que permitió plantear una Situación Hidrogeológica Inicial.

Con el análisis petrofísico de los pozos se pudo establecer de manera indirecta los diferentes niveles acuíferos, logrando una estimación inicial de la salinidad, identificando los potenciales intervalos acuíferos cuya salinidad es menor a 3000 ppm de STD.

Los acuíferos de salinidad menor a 3000 ppm de STD (>1.8 ohmm) se encuentran contenidos en el Grupo Neuquén y la Formación Rayoso.

Debido a las limitaciones de la interpretación petrofísica, los resultados obtenidos en esta instancia de la investigación, deben ser considerados como preliminares y no definitivos.

#### Etapa 2

Mediante la correlación con pozos de áreas vecinas se verificó la presencia y continuidad de los principales intervalos definidos previamente y de uso en el ámbito de las reuniones bimensuales.

Se identificaron nuevos niveles internos de correlación en la Formación Rayoso (niveles 1, 2, 3 y 4 de la Formación Rayoso).

Se correlacionó e integró al bloque La Calera en el esquema hidrogeológico regional, y se confirmó la presencia del sello regional de la base grupo Neuquén (Fm Candeleros).

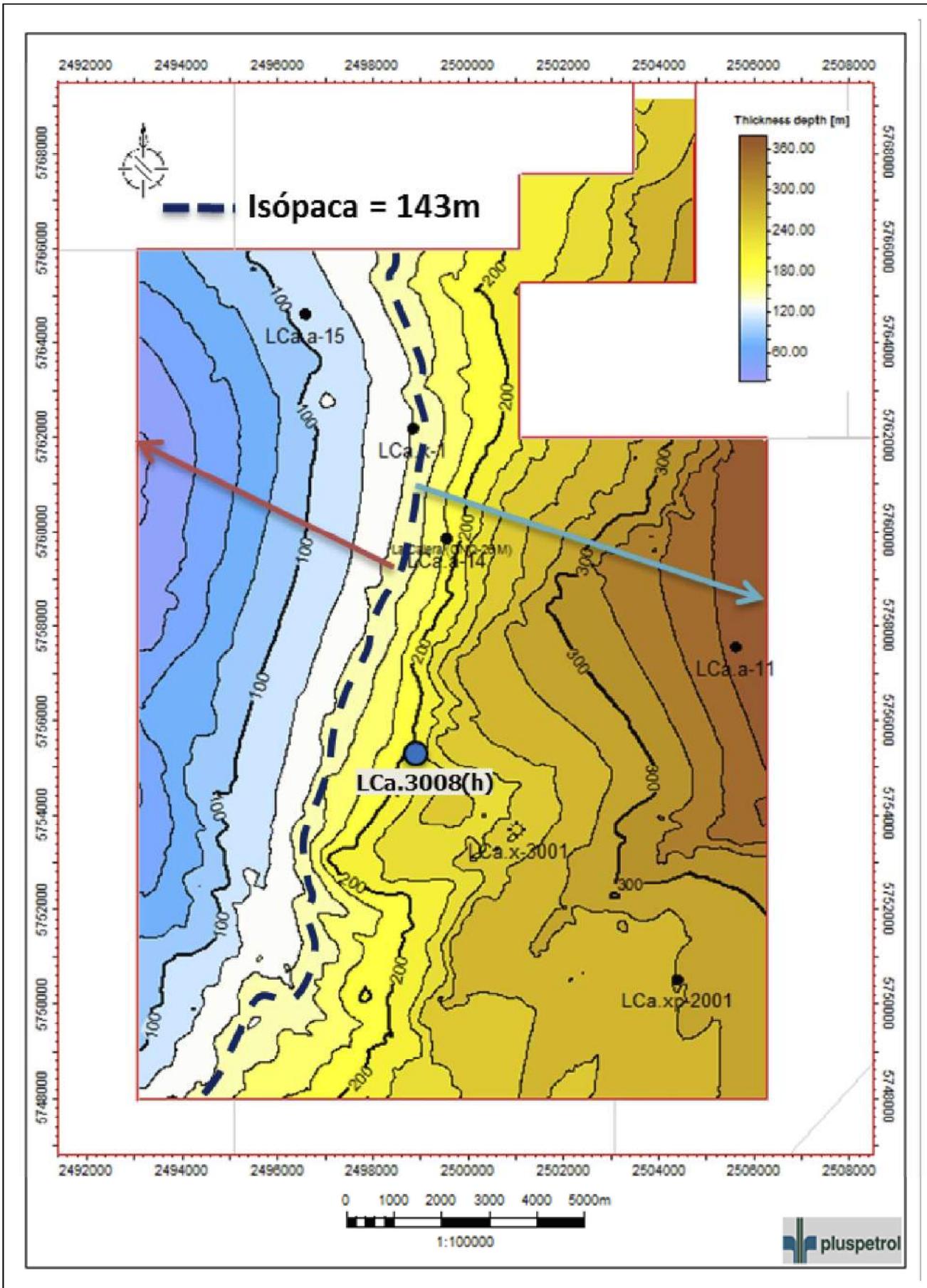


Figura 17. Mapa Isopáquico de la zona saturada para el Grupo Neuquén.

La correlación regional, sumada a los resultados petrofísicos obtenidos permitió asignar, tentativamente salinidades y familias de agua a los diferentes reservorios.

Se identificó una transición de salinidades en la base de la Formación Rayoso (acuitardo), que marca un incremento de salinidades, de <3500 ppm a >30000 ppm, en un intervalo de unos 35m de espesor.

### Etapa 3

El muestreo, análisis químicos y mediciones de presión de reservorios permitió ajustar la caracterización hidrogeológica.

Desde el punto de vista hidroquímico se determinó la de un perfil de salinidad variable, hasta la base de la Formación Rayoso, confirmando la presencia de una zona “de transición”

Los análisis químicos definieron aguas cloruradas y/o sulfatadas sódicas para Grupo Neuquén y Rayoso. También fueron

clasificadas como no aptas para riego, con conductividades regulares a altas y RAS muy alta.

Para la protección de acuíferos se estimó la posición del Nivel Estático del agua y se definió la Zona No Saturada y la Zona Saturada y el Sello Regional del Grupo Neuquén.

Se calculó el espesor permeable de la Zona Saturada. Se construyó un mapa isopáquico de los espesores permeables de la zona saturada en agua, permitiendo dividir el bloque en 2 sectores a partir de la isopaca 143 m. El sector Este donde las secciones guías deben cubrir la totalidad del Grupo Neuquén, asentándose en Formación Candeleros; y hacia el Oeste, donde se debe cubrir la totalidad de la Formación Rayoso, asentando la cañería guía en “zona de transición”, situada en la base de esta Formación.

Se logró cumplir con los requerimientos solicitados por la autoridad a fin de proteger y optimizar la perforación, generando una reducción de tiempos y costos operativos.

### TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- ALONSO, M. (2016).  
Caracterización geológica de la Formación Rayoso y del Subgrupo Río Limay (Grupo Neuquén) y su relación con las aptitudes hidrogeológicas en el sector centro-norte de la provincia del Neuquén.  
*Trabajo Final de Licenciatura. Universidad Nacional del Comahue.*
- COLOMBINO J. & LUENGO M. (2011).  
Regiones Hidrogeológicas. En: Leanza, H., Arregui, C., Carbone, O., Danielli, J. y Vallés, J. (Eds.) Geología y Recursos Naturales de la Provincia del Neuquén,  
*Relatorio del 18º Congreso Geológico Argentino: 833-848, Neuquén.*
- GARRIDO, A.C. (2010).  
Estratigrafía del Grupo Neuquén, Cretácico Superior de la Cuenca Neuquina (Argentina): nueva propuesta de ordenamiento litoestratigráfico.  
*Rev. Mus. Argentino Cienc. Nat., n.s. 12(2):121-177. Buenos Aires, ISSN1514-5158.*
- GARRIDO, A.C. (2011).  
El Grupo Neuquén (Cretácico tardío) en la Cuenca Neuquina.  
*Relatorio del XVIII Congreso Geológico Argentino: Geología y Recursos Naturales de la Provincia del Neuquén, pag. 231-244. Neuquén.*
- HIDROAR. (2017).  
Estudio Hidrogeológico Especializado en el Área La Calera, caracterización de acuíferos grupos Neuquén y Rayoso.  
*Informe Inédito.*
- KÖPPEN W. (1948).  
Climatología - con un estudio de los climas de la Tierra.  
*Fondo de Cultura Económica, (Sección de obra de Geografía)*
- PATTEN, JR., E.P. & BENNETT, G.D. (1963).  
Application of Electrical and Radioactive Well Logging to Groundwater Hydrology.  
*U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 1544-D, 60pp [Resistivity, SP, fluid conductivity, gamma].*
- RODRIGUEZ L., REYNALDI J.M., ANGEL ALVAREZ J.B., MARÍA, S., LAUREANO B., CURETTI N., FAUNDES J. (2020).  
Standardized Workflow For Aquifer Characterization In Neuquén Unconventional Oil & Gas Blocks.  
*Latin America URTEC online. Buenos Aires. https://doi.org/10.15530/urtec-2020-1391*
- ULIANA, M.A. & D.A. DELLAPÉ. (1981).  
Estratigrafía y evolución paleoambiental de la sucesión maestrichtiano- eoterciaria del engolfamiento Neuquino. (Patagonia Septentrional).  
*VIIº Congreso Geológico Argentino. Actas 3: 673-711.*
- ZAVALA C. & PONCE J. (2011).  
La Formación Rayoso (Cretácico temprano) en la Cuenca Neuquina.  
*En Leanza, H., Arregui, C., Carbone, O., Danielli, J. y Vallés, J. (Eds.) Geología y Recursos Naturales de la Provincia del Neuquén, Relatorio del 18º Congreso Geológico Argentino: 205-222, Neuquén.*