



**Universidad Nacional del Comahue**  
**Facultad de Ingeniería**  
**Lic. en Ciencias Geológicas**  
**Departamento de Geología y Petróleo**

**Trabajo Final de Licenciatura**

**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**

Autora: Magalí Alonso

Director: Geol. Adolfo Giusiano

Co-Directora: Dra. Cecilia Dufilho

-2016-

Universidad Nacional del Comahue - Facultad de Ingeniería

Lic. en Ciencias Geológicas - Dpto. de Geología y Petróleo

**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 presentado en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Comahue como parte de los requisitos para obtener el título de:  
**LICENCIADA EN CIENCIAS GEOLÓGICAS**

Autora: Roxana Magalí Alonso – Legajo: ING-704

Director: Geol. Adolfo Giusiano – Director General de Estudios. Subsecretaría de Energía Minería e Hidrocarburos de Neuquén.

Co-Directora: Dra. Cecilia Dufilho – Cátedra de Hidrogeología. Departamento de Geología y Petróleo, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Comahue.

Jurado 1: Geólogo Carlos Alberto Garrido .....

Jurado 2: Geóloga Miriam Minutella .....

Jurado 3: Geólogo Lucas Saccavino .....

Neuquén Capital, Argentina.

Año 2016

## **AGRADECIMIENTOS**

A mi país por darme la posibilidad de acceder a la educación pública.

A la Subsecretaría de Minería, Energía e Hidrocarburos de la Provincia del Neuquén por ceder los datos que hicieron posible la realización de este trabajo.

A Adolfo y Cecilia por el incentivo, el apoyo y todo el tiempo dedicado para que esto sea posible. Fue un placer poder haber compartido este importante proyecto con ustedes.

Al geólogo Diego Licitra por compartir sus conocimientos en cuanto a la interpretación de registros eléctricos y a la geóloga Betina Laurenzano por el aporte de información de gran valor para este trabajo.

A los jurados por sus observaciones y a todos los profesores que a lo largo de cinco años formaron parte de mi formación como profesional.

A la GRAN GEOFAMILIA. Sin ustedes nunca podría haber llegado hasta acá. Gracias por las horas de estudio y por haber estado en las buenas y en las malas.

A los amigos de acá y de allá, que siempre me acompañaron y alentaron a seguir adelante aún cuando el camino no era claro.

A mi familia. Abuelas, tíos, tías, primas, primos. Por el apoyo y ayuda incondicionales que contribuyeron a que este anhelo sea posible.

A mis tíos Raúl y Tere por abrirme las puertas de su casa y hacer posible que empiece a transitar mi vida universitaria.

A mi mamá, papá y hermanos por el sacrificio, apoyo y amor .

A mi compañero de vida Seba, por su compañía incondicional y hacer que transitar este último tramo sea más sencillo.

A Lubo y Rey

## Contenido

|  |    |
|--|----|
| RESUMEN .....  | 10 |
| ABSTRACT .....   | 11 |
| 1 INTRODUCCION .....   | 13 |
| 2 ANTECEDENTES.....  | 15 |
| 3 MARCO TEÓRICO - METODOLÓGICO .....                                 | 19 |
| 3.1.1 Ciclo hidrológico.....   | 19 |
| 3.1.2 Agua Subterránea.....  | 19 |
| 3.6 Propiedades físicas de las rocas y fluidos.....                  | 23 |
| 3.6.1 Porosidad ( $\emptyset$ ).....                                 | 23 |
| 3.6.2 Saturación de agua ( $S_w$ ) .....                             | 24 |
| 3.6.3 Permeabilidad (k).....   | 24 |
| 3.6.4 Resistividad (R).....  | 25 |
| 3.6.5 Resistividad del agua de formación ( $R_w$ ).....              | 25 |
| 3.6.6 Resistividad de la Formación ( $R_o$ ) .....                   | 25 |
| 3.8 Perfiles eléctricos de pozo .....                                | 27 |
| 3.8.1 Ambiente de los registros.....                                 | 28 |
| 3.8.2 Registro de Potencial Espontáneo (SP).....                     | 31 |
| 3.8.3 Registro de Rayos Gamma (GR) .....                             | 32 |
| 3.9.1 Registros de Inducción y con Electrodo Enfocado .....          | 33 |
| 3.10.1 Registro Sónico .....   | 34 |
| 3.12 Calidad del agua .....  | 36 |
| 3.12.1 Agua Potable.....   | 36 |
| 3.14.1 Agua Dulce .....  | 36 |
| 3.16.1 Evolución del agua.....                                       | 38 |
| 3.16.2 Representación de las características químicas del agua ..... | 39 |

|        |  |    |
|--------|--|----|
| 3.19   | Importancia de la caracterización litológica en hidrogeología.....     | 42 |
| 3.20   | Tratamiento de la información .....                                    | 42 |
| 3.21   | Información disponible .....   | 43 |
| 4      | CARACTERIZACION DEL AREA DE ESTUDIO .....                              | 46 |
| 4.1    | Ubicación geográfica .....   | 46 |
| 4.2    | Cuenca Neuquina .....  | 46 |
| 4.5.1  | Estratigrafía.....   | 50 |
| 4.5.2  | Unidades Morfoestructurales .....                                      | 51 |
| 4.9    | Unidades estratigráficas de interés hidrogeológico .....               | 56 |
| 4.9.1  | Grupo Bajada del Agrio (Méndez et al., 1995).....                      | 56 |
| 4.10.1 | Grupo Neuquén (Stipanovic et al., 1968).....                           | 61 |
| 4.11.1 | Características Petrofísicas de las unidades de estudio.....           | 63 |
| 5      | RESULTADOS.....  | 66 |
| 5.1    | Litoestratigrafía en las regiones morfoestructurales .....             | 66 |
| 5.1.1  | Dorso de los Chihuidos.....  | 66 |
| 5.1.2  | Bajo de Añelo.....   | 67 |
| 5.1.3  | Alto de Entre Lomas .....  | 69 |
| 5.2    | Pases formacionales determinados con registros eléctricos.....         | 69 |
| 5.2.1  | Base de la Formación Rayoso.....                                       | 69 |
| 5.2.2  | Tope de la Formación Rayoso y base del Grupo Neuquén.....              | 69 |
| 5.2.3  | Tope del Grupo Neuquén.....  | 70 |
| 5.2.4  | Mapas estructurales al tope de la Formación Rayoso y del Grupo Neuquén | 71 |
| 5.3    | Propiedades acuíferas de las rocas.....                                | 72 |
| 5.3.1  | Criterios límites para las propiedades .....                           | 72 |

|       |   |     |
|-------|---|-----|
| 5.3.2 | Curvas tipo de propiedades hidrogeológicas .....                                    | 74  |
| 5.6.1 | Volumen de arcillas, porosidad y salinidad en las Perforaciones .....               | 75  |
| 5.8   | Dinámica de los acuíferos estimada con la información de pozos existentes           | 81  |
| 5.8.1 | Información disponible de los niveles piezométricos medidos en pozos                | 81  |
| 5.8.2 | Unidad acuífera Fm. Rayoso.....   | 82  |
| 5.8.3 | Unidad acuífera Gr. Neuquén .....   | 83  |
| 5.9   | Hidrogenoquímica de las unidades acuíferas en las regiones morfoestructurales ..... | 84  |
| 5.9.1 | Diagrama de Piper-Hill- Langelier .....   | 85  |
| 5.9.2 | Diagrama de Stiff .....   | 85  |
| 6     | DISCUSIÓN.....  | 88  |
| 7     | CONCLUSIONES .....  | 91  |
| 7.1   | Futuras líneas de investigación .....   | 92  |
|       | BIBLIOGRAFIA .....  | 93  |
|       | ANEXOS .....  | 101 |
|       | ANEXO 1: Valores de referencia .....  | 101 |
|       | ANEXO 2: Información de los pozos utilizados .....                                  | 103 |
|       | ANEXO 3: Aptitudes hidrogeológicas y análisis hidroquímicos .....                   | 104 |

## Índice de Figuras

|   |    |
|---|----|
| Figura 3.1. Distribución del agua en la Tierra. Modificado de <a href="http://educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/2500/2578/html/1_hidrosfera_origen_y_distribucion.html">http://educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/2500/2578/html/1_hidrosfera_origen_y_distribucion.html</a> ..... | 19 |
| 3.2. Distribución vertical del agua en el subsuelo. ....  | 20 |
| Figura 3.3. Tipo de acuíferos y su relación con el nivel piezométrico. Brassington, (1995). ....  | 22 |
| 3.4. Esquema de acuíferos semiconfinados y libres. Sánchez San Román, (2014)..  | 22 |
| Figura 3.5. Esquema de acuífero confinado y su relación con el nivel freático. ....   | 23 |
| Figura 3.6. Ejemplo de perfiles organizados en cuatro pistas y profundidad indicada. ....   | 27 |
| Figura 3.7. Modelo esquemático de un pozo y la formación estudiada para describir la respuesta de los perfiles. ....  | 29 |
| Figura 3.8. Distribución radial de resistividades en una zona acuífera. ....  | 30 |
| Figura 3.9. Representación de la curva de Potencial Espontáneo de acuerdo a la litología y variación de la línea de base de lutitas. Modificado de Wonik & Hinsby, 2006.  | 31 |
| Figura 3.10. Representación de la curva de GR de acuerdo a la litología presente. Modificado de Wonik y Hinsby, 2006. ....  | 32 |
| Figura 3.11. Ejemplo de registro de inducción y laterolog para medir valores de resistividad somera, intermedia y profunda. Modificado de Wonik y Hinsby, 2006.....   | 33 |
| Figura 3.12. Comportamiento del registro sísmico de acuerdo a la litología presente. Modificado de Wonik y Hinsby, 2006. ....   | 34 |
| 3.13. Procesos que modifican la composición química del agua .....  | 38 |
| 3.14. Evolución del agua de acuerdo a la Secuencia de Chevotareb. Lillo, (2007)..   | 39 |
| Figura 3.15. Diagrama de Piper-Hill-Langelier y sus respectivas facies hidroquímicas. Modificado de Sánchez San Román. ....   | 40 |
| Figura 3.16. Representación de las concentraciones de cationes y aniones en un diagrama de Stiff. ....  | 41 |
| Figura 3.17. Tipos de agua según el diagrama de Stiff. ....   | 42 |
| Figura 3.18. Distribución de pozos de agua e hidrocarbúferos seleccionados en el área de estudio. ....  | 45 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 4.1. Ubicación del área de estudio y regiones morfoestructurales. ....   | 46 |
| Figura 4.2. Evolución y columna estratigráfica de la Cuenca Neuquina. Fuente: Petrobras. ....   | 48 |
| Figura 4.3. Principales unidades morfoestructurales de la Cordillera Principal y del Engolfamiento Neuquino. Mosquera y Ramos, (2005). ....   | 52 |
| Figura 4.4. Sección sísmica regional SS1, a lo largo de la región más oriental de la faja plegada y corrida del Agrio y el sistema Chihuidos - Entre Lomas. La localización de la sección SS1 se indica en la figura 4.3. Mosquera y Ramos, (2005). ....                                      | 53 |
| Figura 4.5. Red de drenaje marcada con líneas discontinuas en azul al sur del área del Dorso de los Chihuidos. ....   | 54 |
| Figura 4.6. Síntesis de las subdivisiones estratigráficas propuestas para la Fm. Rayoso por diversos autores. Zavala et. al., (2011). ....  | 57 |
| Figura 4.7. Columna estratigráfica generalizada para la Fm. Rayoso. Modificado de Zavala et. al, (2001; 2006). Zavala et. al., (2011). ....   | 59 |
| Figura 4.8. Columna estratigráfica del Grupo Neuquén. Rainoldi et al., (2014). ....   | 61 |
| Figura 5.1. Mapa isopáquico en metros del Gr. Neuquén. ....   | 66 |
| Figura 5.2. Columnas litológicas esquemáticas para cada región morfoestructural. ....   | 67 |
| Figura 5.3. Mapa isopáquico en metros de la Fm. Rayoso. ....  | 68 |
| Figura 5.4. Comportamiento tipo de un set de registros eléctricos para las tres regiones morfoestructurales. Profundidad medida en metros sobre el nivel del mar. ....  | 70 |
| Figura 5.5. Mapa estructural al tope del Gr. Neuquén medido en mbbp. ....   | 71 |
| Figura 5.6. Mapa estructural al tope de la Fm. Rayoso medido en mbbp. ....  | 72 |
| Figura 5.7. Set de perfiles eléctricos y curvas generadas de aptitudes hidrogeológicas. ....  | 75 |
| Figura 5.8. Ubicación de la transectas A-A' (color negro), B-B' (color verde), C-C' (color violeta) y D-D' (color rojo). ....   | 76 |
| Figura 5.9. Transecta A-A'. Profundidad medida en msnm. Curvas generadas de volumen de arcillas (Vsh, pista 1), porosidad (PHI, pista 2), salinidad (SAL, pista 3), y potenciales niveles acuíferos (AC, pista 4) y rangos de profundidades de los acuíferos en pozos de agua (pista 1). .... | 78 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 5.10. Transecta B-B'. Profundidad medida en msnm. Curvas generadas de volumen de arcillas (Vsh, pista 1), porosidad (PHI, pista 2), salinidad (SAL, pista 3), y potenciales niveles acuíferos (AC, pista 4) y rangos de profundidades de los acuíferos en pozos de agua (pista 1). .....                         | 79 |
| Figura 5.11. Transecta C-C'. Profundidad medida en msnm. Curvas generadas de volumen de arcillas (Vsh, pista 1), porosidad (PHI, pista 2), salinidad (SAL, pista 3), y potenciales niveles acuíferos (AC, pista 4) y rangos de profundidades de los acuíferos en pozos de agua (pista 1 y pista 5 en pozo BAñ-9). ..... | 80 |
| Figura 5.12. Transecta D-D'. Profundidad medida en msnm. Curvas generadas de volumen de arcillas (Vsh, pista 1), porosidad (PHI, pista 2), salinidad (SAL, pista 3), y potenciales niveles acuíferos (AC, pista 4) y rangos de profundidades de los acuíferos en pozos de agua (pista 1). .....                         | 80 |
| Figura 5.13. Mapa potenciométrico de la Fm. Rayoso.....   | 83 |
| Figura 5.14. Mapa potenciométrico del Gr. Neuquén .....   | 84 |
| Figura 5.15. Representación de análisis hidroquímicos de nueve pozos en el diagrama de Piper-Hill-Langelier.....  | 85 |
| Figura 5.16. Representación en el diagrama de Stiff de las muestras de agua. ....   | 86 |
| Figura 5.17. Representación geográfica de los resultados obtenidos a partir del .diagrama de Stiff en el área de estudio.....   | 87 |

## RESUMEN

La zona extraandina de la provincia del Neuquén presenta un clima árido con precipitaciones anuales menores a 200 mm, determinando que los recursos hídricos superficiales están restringidos a las áreas cercanas a los valles aluviales de los ríos Neuquén, Colorado o Negro. De esta manera el agua subterránea se transforma en el único recurso para pequeños productores rurales y para la explotación hidrocarburífera.

Dentro de las rocas sedimentarias de la Cuenca Neuquina, la Formación Rayoso (Herrero Ducloux, 1946) y la sección inferior del Grupo Neuquén (Cazau & Uliana, 1973), presentan los niveles estratigráficos con mayor potencial hidrogeológico y algunos de estos son explotados en la región. La Formación Rayoso (Aptiano superior - Albiano), está integrada por un conjunto de niveles pelíticos con intercalaciones de anhidritas, carbonatos, espesos bancos de areniscas medias a finas y delgados niveles de fangolitas, depositados en un ambiente lacustre salobre perenne con flujos hiperpícnicos asociados a deltas subacuáticos (Zavala & Ponce, 2011). La sección inferior del Gr. Neuquén (formaciones Candeleros, Huincul y Cerro Lisandro) (Cenomaniano - Turoniano), está conformado por acumulaciones de conglomerados, areniscas y fangolitas, depositados a partir de sistemas fluviales entrelazados y meandriformes.

La caracterización de estas unidades se realizó utilizando información geológica de superficie y de subsuelo junto con la interpretación de perfiles eléctricos de pozo.

Para la determinación de las aptitudes hidrogeológicas, se utilizaron registros resistivos, de rayos gamma y sónico. A partir de estos, se interpretaron diferentes parámetros, los cuales son necesarios para evaluar volumen de arcillas y realizar los cálculos estandarizados con las ecuaciones de Archie (1942) y Wyllie et. al., (1958) que permiten estimar porosidad y salinidad.

Se ha determinado que los principales niveles acuíferos se encuentran entre 0 y 600 mbbp. La cantidad de unidades acuíferas y su continuidad depende de la distribución de los depósitos, los cuales presentan cierta lateralidad por zonas. Por otra parte, los valores obtenidos a partir del procesamiento de los perfiles eléctricos, ha permitido estimar

salinidades menores a 3000 ppm (eq. a NaCl) en capas de 1 m o más de espesor, cuya porosidad varía entre 15 y 25 % y el contenido de arcillas entre 10 y 50 %.

## **ABSTRACT**

The extraandean area of the Neuquen province has an arid climate with less than 200 mm annual rainfalls, so that surface water resources are restricted to areas near the alluvial valleys of the Neuquen, Colorado or Negro rivers. In this way the groundwater constitutes the only resource for small farmers and for oil exploitation.

Within the sedimentary rocks of the Neuquén Basin, the Rayoso Formation (Ducloux Herrero, 1946) and the lower section of Neuquén Group (Cazau & Uliana, 1973), are the stratigraphic levels with the greatest hydrogeological potential and some of them are exploited in the region. The Rayoso Formation (upper Aptian - Albian), is composed of a set of pelitic levels interbedded with anhydrite, carbonates, thick banks of fine - medium sandstones and thin levels of mudstones deposited in a brackish perennial lacustrine environment with hyperpycnal flows associated with underwater deltas (Zavala & Ponce, 2011). The lower section of Gr Neuquén (Candeleros, Huincul and Cerro Lisandro formations) (Cenomanian - Turonian) consists of accumulations of conglomerates, sandstones and mudstones, deposited from meandering and braided fluvial systems.

The characterization of these units was performed using surface and subsurface geological information together with the interpretation of electrical well logs.

For the determination of hydrogeological aptitudes, resistive, gamma ray and sonic logs they were used. From these, different parameters were interpreted, which are necessary to evaluate volume of clays and perform standardized calculations with Archie (1942) and Wyllie et. al., (1958) equations to estimate porosity and salinity.

It has been determined that the main aquifer levels are between 0 and 600 mbbp. The amount and continuity of aquifer units depends on the distribution of the deposits, which have certain laterality by area. Moreover, the obtained values from the processing of electrical logs has allowed estimate salinities lower than 3000 ppm (eq. NaCl) in layers of

1 m or more thick, with porosities between 15 and 25% and the clay content between 10 and 50%.

# 1 INTRODUCCION

El 22.8 % del agua dulce disponible en la Tierra corresponde a agua subterránea. La calidad y la facilidad de extraerla dependen de las características físico-químicas y litológicas de las formaciones en las que se aloja.

El agua subterránea es de vital importancia en zonas áridas y constituye la mayor fuente de agua dulce producto de la escasez de fuentes superficiales. El aumento en la demanda de este recurso subsuperficial conduce a la sobreexplotación de los acuíferos, lo que provoca una disminución del nivel estático y de las reservas de agua y posiblemente una disminución de la calidad del agua del acuífero.

Para evitar los problemas originados por el abastecimiento de agua subterránea es importante determinar la cantidad disponible y de qué manera se va a extraer el recurso, para lo cual resulta pertinente conocer el balance hidrológico de los acuíferos. Las aptitudes y el comportamiento de los acuíferos dependen de las variaciones físicas y químicas del subsuelo, tanto en profundidad como lateralmente.

La Cuenca del Bajo de Añelo (Provincia del Neuquén), se ubica en el contexto de una región árida, cuya precipitación anual no supera los 200 mm. En esta zona, además de la existencia de poblaciones que se abastecen de agua subterránea, es actualmente uno de los puntos con mayor desarrollo de la industria hidrocarburífera. A pesar de esto, la información disponible y el conocimiento sobre las características y el comportamiento de las unidades acuíferas es escaso. Por esto, surge la necesidad de utilizar métodos indirectos para complementar la información aportada por las perforaciones y permitan evaluar el estado y comportamiento de los acuíferos. En el presente Trabajo Final de Licenciatura (TFL) se dan a conocer los resultados de la interpretación de perfiles eléctricos, registrados en pozos hidrocarburíferos, como método indirecto para la caracterización y evaluación hidrogeológica de las formaciones sedimentarias presentes en el subsuelo del área del Bajo de Añelo.

## **Objetivos**

El objetivo de este trabajo fue realizar una caracterización geológica e interpretación de las aptitudes hidrogeológicas de la Formación Rayoso y el Grupo Neuquén (Subgrupo Río Limay, formaciones Candeleros, Huincul y Cerro Lisandro) en la región centro este de la Provincia del Neuquén, utilizando perfiles eléctricos de pozo de uso en la industria petrolera.

Con los datos obtenidos de la interpretación de los registros eléctricos de pozo y de los datos obtenidos a partir de análisis hidroquímicos se realizaron mapas temáticos que permitieron comprender la dinámica de los acuíferos presentes en la región de estudio.

El cumplimiento de estos objetivos ha permitido una recopilación y análisis hidrogeológico con resultados a escala de cuenca que deberán ser mejorados cuando se disponga de más sitios con información de pozos.

## 2 ANTECEDENTES

Para la realización del presente estudio se recopilaron antecedentes de métodos eléctricos en perforaciones utilizados para la interpretación de propiedades de las rocas y antecedentes de estudios hidrogeológicos en la región.

### 1. Perfiles eléctricos

Los antecedentes del uso de perfiles eléctricos de pozo hidrocarburíferos aplicados a la hidrogeología no son muy frecuentes y en Argentina solo se utilizan en aquellas regiones donde se desarrolla dicha actividad.

Entre estos trabajos se puede citar la publicación de Patten & Bennett (1963), que proponen que para una mejor interpretación hidrogeológica se debe utilizar la mayor cantidad de registros posibles. Además expone que los criterios utilizados en la industria del petróleo para determinar la litología mediante registros eléctricos son aplicables con buenos resultados en hidrogeología. Sin embargo, para la determinación de diferentes parámetros en los acuíferos es necesario considerar que las herramientas pueden arrojar lecturas erróneas en niveles no tan profundos en el subsuelo.

Keys (1990) en su trabajo sobre geofísica de pozo aplicada al agua subterránea, hace mención al caso de la perforación de un pozo para el estudio regional de un acuífero, el cual se basa en la evaluación de las calizas Madison en Wyoming (E.E.U.U.). Para el estudio, los registros neutrónicos y rayos gamma fueron los de mayor utilidad para caracterizar y correlacionar unidades. Keys (op. cit.) propone que para optimizar los resultados de las técnicas de perfilaje en hidrología, el programa de perfilaje debe estar correctamente planificado y la calidad de las herramientas garantizada, mientras que la interpretación de los registros se debe realizar una vez comprendidos los principios básicos de cada técnica, las relaciones entre las rocas y los fluidos que contienen y la construcción del pozo.

La Comisión Nacional del Agua (2007), hace hincapié en la prospección geoelectrica y en los perfiles eléctricos de pozo como método para el estudio y evaluación de los acuíferos. De acuerdo a este manual, con los registros eléctricos de pozo se pueden determinar diferentes características que dependen de la litología o de las condiciones del

fluido alojado. Así, la resistividad, el factor de formación y la porosidad están directamente ligados a la litología, mientras que la conductividad, temperatura y movilidad dependen de los parámetros del fluido.

## **2. Estudios hidrogeológicos en la región extra andina de Neuquén.**

Mancini & Uliana (1973) analizaron las características de las areniscas del Grupo Neuquén como fuente de agua subterránea para recuperación secundaria en el área de explotación petrolífera de Entre Lomas (Provincia del Neuquén). Los antecedentes de este trabajo informan la existencia de pozos de agua en el área Medanito, cuyos intervalos productivos corresponden a la sección superior del Grupo Neuquén (130 y 230 mbbp) con caudales superiores a los 1700 m<sup>3</sup>/d. En este caso, el agua es de muy buena calidad con un contenido mínimo de gases disueltos, sólidos en suspensión y hierro. En el área Catriel Oeste las unidades acuíferas se encuentran entre los 100 y 280 mbbp con un caudal de producción de hasta 1600 m<sup>3</sup>/d y buena calidad del agua.

Mancini & Uliana (op. cit.) realizaron ensayos preliminares en el área Charco Bayo, donde los horizontes productivos se encuentran entre los 400 y 600 mbbp con caudales de producción de hasta 1400 m<sup>3</sup>/d y bajo contenido de SH<sub>2</sub>. Esto último estaba relacionado a un grado de contaminación muy bajo, del orden de 1-10 bacterias/mL. Debido a que se trata de niveles bastante profundos se planteó la perforación de un pozo cuyo objetivo fueron las areniscas de la Formación Allen (Grupo Malargüe).

Primo & González (1973), consideraron la posible utilización del agua subterránea en las areniscas del Grupo Neuquén en la Cuenca Neuquina para proyectos de recuperación secundaria. Utilizaron los registros de potencial espontáneo para determinar la calidad del agua y los resistivos para estimar la porosidad. Para el área de Puesto Hernández obtuvieron valores de salinidad de 1,7 gr/L (eq. NaCl) en areniscas ubicadas entre los 100 y 300 mbbp, mientras que en Aguada San Roque la salinidad en unidades hasta los 150 mbbp es de 0,64 gr/l (NaCl) y entre los 180 y 300 mbbp es de 9,4 gr/L (NaCl).

Según un informe inédito de la consultora Natural Survey Consulting, S.A., (1996), en el yacimiento El Trapial se realizaron pozos en el Grupo Neuquén hasta una profundidad

de 600 mbbp, con niveles estáticos en 400 mbbp y aguas con 4,857 mg/L de cloruro de sodio.

En el año 2000 la Secretaria de Estado del COPADE (Fiori & Zalba, 2000), publicó un informe sobre el Plan de Manejo de la Reserva Provincial Auca Mahuida, donde señalan que en trabajos realizados sobre acuíferos del Grupo Neuquén, los caudales productivos varían entre 48 m<sup>3</sup>/día y 86 m<sup>3</sup>/día y el contenido de sales de esas aguas es de entre 1000 y 7000 mg/L.

En el año 2008 la petrolera Entre Lomas realizó un informe sobre los acuíferos en el área de Bajada del Palo (Provincia del Neuquén), donde señalan caudales de bombeo de hasta 250 m<sup>3</sup>/día en unidades del Grupo Neuquén ubicadas entre los 300 y 600 mbbp, cuyo espesor permeable total es de 60 m aproximadamente y las aguas son principalmente sulfatadas cálcicas.

La empresa GEO COMAHUE, el año 2009, realizó una prospección geoléctrica de aguas subterráneas en el área de Aguada San Roque (dpto. de Añelo, Provincia del Neuquén). Los estudios realizados indican que hasta los 150 m de profundidad predominan las arcillas limoarenosas, siendo poco posible la localización de niveles acuíferos. En este informe se menciona un pozo productor en el área con datos sin corroborar, cuya profundidad sería de 250 m (Fm. Rayoso) y el caudal productivo superior a 240 m<sup>3</sup>/día con agua muy salobre.

Colombino & Luengo (2011), en su trabajo publicado en el Congreso Geológico Argentino del año 2011, divide a la Provincia del Neuquén en Regiones Hidrogeológicas. La Región Noreste comprende una extensa zona ubicada al norte del Río Neuquén que puede ser dividida en dos zonas: al norte del volcán Auca Mahuida que se presenta como la zona de recarga y una porción sur que constituye el reservorio.

Sticco, M. (2014 y 215) realizó informes con ensayos de bombeo, niveles, calidad química y litología de diferentes pozos de agua ubicados en el área del Dorso de los Chihuidos para la empresa TOTAL AUSTRAL S.A. De acuerdo a los ensayos realizados, los niveles acuíferos corresponden a las areniscas del Grupo Neuquén y a la sección

superior de la Formación Rayoso y la calidad del agua de los mismos se evaluó a partir de análisis de laboratorio.

Chiachiarelli & Viquerira (2015) realizaron una caracterización y mapeo del Grupo Neuquén en el yacimiento Loma Campana utilizando registros de rayos gamma, resistivos y en algunos casos de potencial espontáneo. De esta manera determinaron entre 9 y 11 capas de areniscas ubicadas desde 0 hasta 350 mbbp que podrían actuar como niveles acuíferos, con espesores entre 4 y 60 m y buena continuidad lateral, tanto en dirección norte-sur, como este-oeste, acuniándose solo algunas capas de reducido espesor.

A partir de 2014 en el Proyecto de Investigación Hidrogeología de la Provincia de Neuquén de la Universidad Nacional del Comahue (04/I205) se está recopilando información de perforaciones para generar el inventario hidrogeológico de la provincia que contiene información georeferenciada en un Sistema de Información Geográfico (HidrogeoSIG). Este estudio abarca toda la provincia de Neuquén por lo que incluye información de otras regiones.

### 3 MARCO TEÓRICO - METODOLÓGICO

#### 3.1 Hidrogeología

La hidrogeología es una parte importante de la hidrología; como ciencia se ocupa de evaluar la presencia, disponibilidad y calidad del agua subterránea.

##### 3.1.1 Ciclo hidrológico

El proceso cíclico por el que el agua pasa de la atmósfera a la superficie terrestre para volver a la atmósfera se llama ciclo del agua. Los principales procesos que intervienen son la precipitación, la evaporación, la transpiración, la condensación, la escorrentía, la infiltración. (Fig. 3.1). De esta manera, el sol, fuente de energía, provoca la evaporación del agua continental y de los océanos. Las plantas, además aportan vapor de agua a la atmósfera. El aire cargado de humedad, al ascender y enfriarse, se condensa y origina las nubes. Así, el agua regresa a la superficie terrestre en forma de lluvia, nieve o granizo (precipitaciones) y escurre hacia los lagos, mares y océanos repitiéndose el proceso.

##### 3.1.2 Agua Subterránea

La mayor parte del agua del planeta está en mares y océanos cubriendo casi las tres cuartas partes de la superficie terrestre, el resto corresponde a agua dulce de los ríos, lagos glaciares y subterránea (Fig. 3.1).

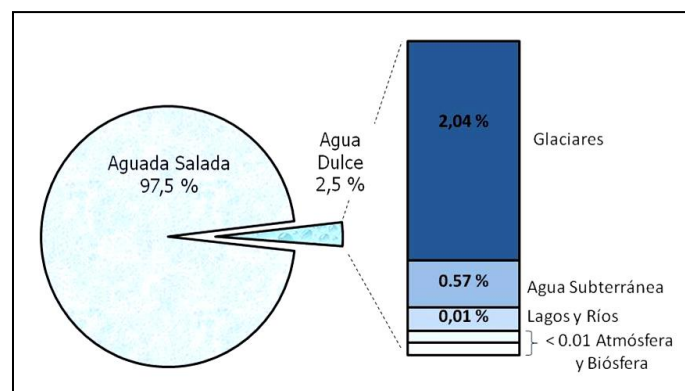


Figura 3.1. Distribución del agua en la Tierra. Modificado de [http://educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/2500/2578/html/1\\_hidrosfera\\_origen\\_y\\_distribucin.html](http://educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/2500/2578/html/1_hidrosfera_origen_y_distribucin.html)

El agua subterránea es la existente bajo la superficie terrestre, en distintos estados y relaciones de composición con la parte sólida y gaseosa; que puede ser colectada mediante

perforaciones, túneles o galerías de drenaje o que fluye naturalmente hacia la superficie a través de manantiales o filtraciones a los cuerpos de agua.

El agua subterránea, además, representa una fase muy importante del ciclo hidrológico ya que parte del flujo en corrientes permanentes de agua proviene del agua subterránea.

El agua subsuperficial se divide verticalmente en dos zonas, de acuerdo a la proporción de poros ocupados por agua: zona saturada y zona no saturada (Fig. 3.2).

### 3.2 Zona no saturada

Se extiende desde la superficie freática hasta la superficie del terreno. La presión del agua en el suelo es menor a la atmosférica. Se subdivide en tres zonas (Bear, 1972):

Zona capilar: El agua de la napa freática asciende por capilaridad.

Zona vadosa: El agua en microporos es inmóvil y depende de fuerzas higroscópicas y capilares. Es la zona de percolación del agua hacia el acuífero.

Zona agua-suelo: Se extiende desde la superficie de terreno hasta la profundidad de exploración de las raíces. Está afectada por las condiciones de superficie, tales como fluctuaciones estacionales y diurnas de irrigación, precipitación, humedad, temperatura del aire, etc.

### 3.3 Zona saturada - Acuíferos

Es la región que se extiende por debajo de la zona no saturada (Fig.3.2) donde los poros del suelo y de las rocas de las formaciones geológicas están completamente llenos de agua formando los acuíferos. El valor de un acuífero como fuente potencial de suministro de

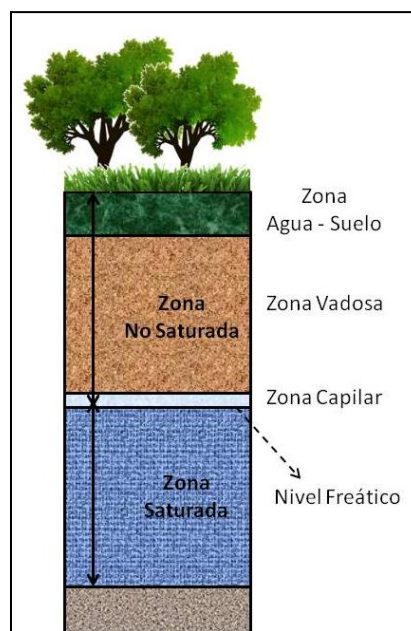


Figura 3.2. Distribución vertical del agua en el subsuelo.

agua depende principalmente de dos características que le son intrínsecas: su capacidad para almacenarla y su aptitud para transmitirla.

### 3.4 Clasificación de formaciones geológicas según su comportamiento hidrogeológico

Las formaciones geológicas se pueden clasificar según su aptitud para formar acuíferos en:

**Acuífero:** del latín *fero*, llevar. Es una formación geológica que contiene agua y cuyas características permiten que esta circule con facilidad. Ejemplos: arenas, gravas, rocas compactas con alto grado de fracturación.

**Acuicludo:** del latín *cludo*, encerrar. Es una unidad que contiene agua en cantidad apreciable y que no permite que el agua circule a través de ella. Ejemplos: Un m<sup>3</sup> de arcilla contiene más agua que el mismo volumen de arenas, pero el agua no puede circular por gravedad y por lo tanto tampoco lo hará en el subsuelo, tanto en condiciones naturales como hacia un pozo que este bombeando.

**Acuitardo:** del latín *tardo*, retardar, impedir. Formación geológica que contiene agua en cantidad apreciable pero que circula con dificultad. Corresponde a una situación intermedia entre las dos anteriores. Ejemplos: Arenas arcillosas, areniscas, rocas compactas con fracturación y/o alteración moderada.

**Acuífugo:** del latín *fugo*, rechazar, ahuyentar. Esta formación no contiene agua, debido a que impide la circulación de esta. Ejemplos: granitos y/o esquistos no alterados y no fracturados.

### 3.5 Clasificación de los acuíferos según su funcionamiento hidráulico

Si un acuífero está cubierto por un estrato impermeable se denomina **acuífero confinado, artesiano o cautivo** (Fig. 3.3), encontrándose el agua sometida a una presión generalmente mayor a la atmosférica por el peso de la sobrecarga y el propio nivel hidrostático. Si un pozo penetra la capa confinante, el agua subirá hasta alcanzar el nivel piezométrico, que es el equivalente artesiano del nivel freático, y si ese nivel se encuentra por encima de la superficie del terreno, el pozo actuará como pozo surgente.

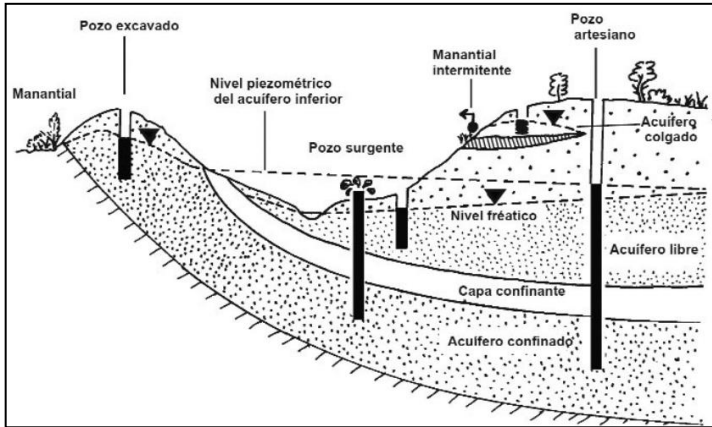


Figura 3.3. Tipo de acuíferos y su relación con el nivel piezométrico. Brassington, (1995).

Los **acuíferos semiconfinados** (Fig.3.4) son más frecuentes que los confinados. En esta caso, son acuíferos cuya presión es mayor a la atmosférica, pero alguna de las capas confinantes son semipermeables o acuitardos que permiten la filtración de agua hacia el acuífero.

Por otra parte, si un acuífero no tiene ningún manto impermeable por encima, se denomina **acuífero no confinado o libre o freático** (Fig. 3.4). En este caso el agua satura los espacios porosos y puede drenar de forma natural o por bombeo. Este tipo de acuíferos se encuentran en contacto con la zona no saturada. La superficie freática está sometida a la

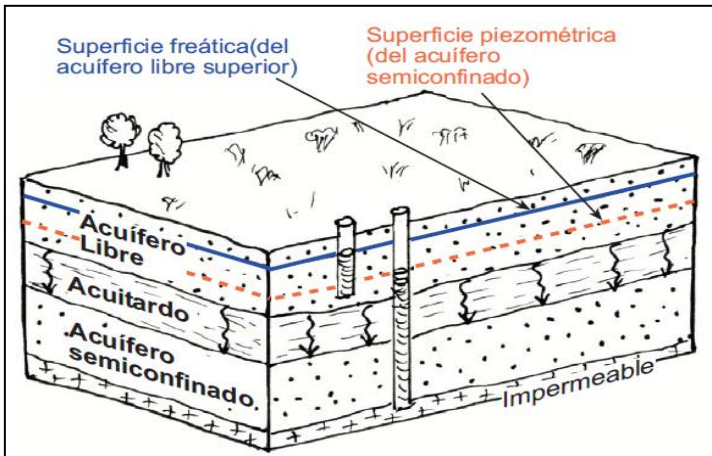


Figura 3.4. Esquema de acuíferos semiconfinados y libres. Sánchez San Román, (2014).

presión atmosférica aumentando la presión con la profundidad. La superficie freática en una región continua que varía su nivel en función del balance hídrológico aumentando de nivel cuando la recarga es mayor que la descarga y viceversa. En los casos en los que el nivel freático se encuentra a poca profundidad, la zona

vadosa no está presente y el agua asciende por capilaridad hasta la superficie.

Cuando el nivel freático se encuentra a cierta profundidad y existe un nivel impermeable que lo sustente, se producen **acuíferos colgados** (Fig. 3.5), normalmente de dimensiones reducidas.

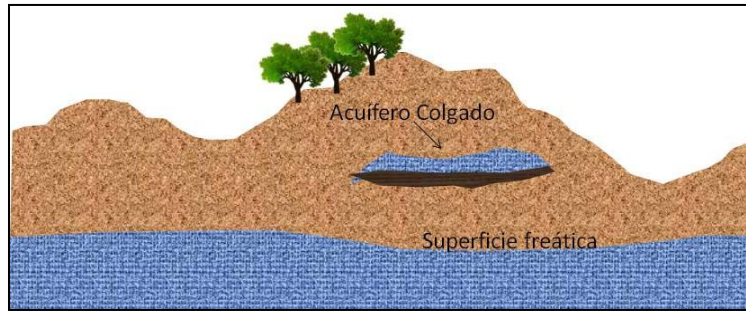


Figura 3.5. Esquema de acuífero confinado y su relación con el nivel freático.

El nivel del agua subterránea varía con el tiempo y de forma muy diversa, debido a causas naturales o antrópicas. Las oscilaciones del nivel freático se deben a causas que suponen un cambio en el almacenamiento subterráneo, tales como la sucesión de épocas secas y húmedas, variaciones de niveles en cuerpos de agua conectados al acuífero, extracción de agua por bombeo o recarga por inyección, entre otras. Las oscilaciones de los niveles piezométricos pueden ser rápidas (desde menores a un minuto a poco más de un día) o de periodos largos (que se repiten en base a un ciclo semianual, anual o de varios años) (Custodio & Llamas, 1976).

Una *Unidad Hidrogeológica* agrupa a varias formaciones geológicas que están conectadas y cuyo funcionamiento hidrogeológico (entradas, salidas, balance) es considerado en conjunto. Dentro de esta unidad puede haber uno o varios acuíferos, acuitardos o acuicludos entre ellos.

### 3.6 Propiedades físicas de las rocas y fluidos

Las rocas tienen numerosas y únicas propiedades físicas asociadas. A continuación se describen aquellas que pueden ser estimadas a partir de la lectura de los registros eléctricos de pozo y que tienen interés hidrogeológico.

#### 3.6.1 Porosidad ( $\emptyset$ )

Es el volumen de poros por unidad de volumen de formación. Como los poros siempre contienen algún tipo de fluido (aire, agua, hidrocarburos, etc.).

El valor de la porosidad es adimensional y menor a la unidad, pero suele expresarse en forma de porcentaje.

### 3.6.2 Saturación de agua ( $S_w$ )

Es la fracción de espacio poral ocupada por agua. La saturación de agua es adimensional y menor a la unidad, aunque puede ser expresada en términos de porcentaje. Cuando la roca contiene agua y otro fluido, la saturación de este último es igual a  $1 - S_w$ .

Para calcular la saturación de agua se utiliza la porosidad efectiva, es decir la que corresponde a los poros interconectados.

$S_w$  no suele ser nula, siempre hay una cantidad de agua adherida a los granos por presión capilar y se conoce como Saturación de Agua Irreductible ( $S_{wirr}$ ).

### 3.6.3 Permeabilidad ( $k$ )

Mide la facilidad con la que fluye un fluido de determinada viscosidad a través de los poros de una roca.

La unidad utilizada para la permeabilidad es el darcy, la cual implica que existe un flujo de  $1 \text{ cm}^3/\text{seg}$  de un fluido cuya viscosidad es de  $1 \text{ cp}$ , por un cubo de  $1 \text{ cm}$  de largo y  $1 \text{ cm}^2$  de sección al aplicar un diferencial de presión igual a  $1 \text{ atmósfera}$ . Como los valores de permeabilidad obtenidos en darcy son muy grandes se utiliza la milésima parte de este: el milidarcy (md).

En hidrología subterránea se utiliza conductividad hidráulica. Hubbert (1940) desarrollo la ecuación 1 considerando las relaciones entre las fuerzas impulsoras y de resistencia a una escala microscópica de un flujo atravesando un medio poroso, así la ecuación 1 describe la relación entre la permeabilidad medida en darcy y la conductividad hidráulica expresada en  $\text{cm}/\text{seg}$ .

$$K = \frac{k * \rho * g}{\mu} \quad \text{Ecuación 1}$$

donde

$K$ : Conductividad hidráulica

$k$ : Permeabilidad

$\rho$ : Densidad

$\mu$ : Viscosidad

$g$ : Aceleración de la gravedad

#### 3.6.4 Resistividad ( $R$ )

Es la resistencia de una sustancia al paso de la corriente eléctrica por volumen unitario. Se calcula conociendo la resistencia medida entre lados opuestos de un cierto volumen de la sustancia multiplicada por el área y dividida por la longitud (Ec. 2).

$$R = r \frac{A}{L} \quad \text{Ecuación 2}$$

donde

$R$ : Resistividad en ohms.metro

$r$ : Resistencia en ohms

$A$ : Área en  $m^2$

$L$ : Longitud en m

El recíproco de la resistividad es la conductividad  $C$  (Ec. 3) que se expresa en Mohs.m.

$$C = \frac{1000}{R} \quad \text{Ecuación 3}$$

#### 3.6.5 Resistividad del agua de formación ( $R_w$ )

Es la resistencia eléctrica que presenta el agua que llena el espacio poral y depende de la salinidad y la temperatura.

#### 3.6.6 Resistividad de la Formación ( $R_o$ )

Es la resistencia que presenta una roca al flujo de la corriente eléctrica y se expresa en  $ohm.m^2/m$ .

Se determinó experimentalmente que la resistividad de una roca limpia, 100 % saturada por agua, es proporcional a la resistividad del agua que contiene. El factor de

formación  $F$  es la constante de proporcionalidad que relaciona la resistividad de la formación y la del agua alojada en los poros, como lo indica la ecuación 4.

$$R_o = F * R_w \quad \text{Ecuación 4}$$

donde

$F$ : Factor de formación

$R_w$ : Resistividad del agua que satura los poros

$R_o$  es una forma especial de  $R_r$ . Esta última es la resistividad de la formación en la zona virgen o que no ha sido afectada por el proceso de perforación.

$F$  es una constante de la formación bajo consideración. El valor de  $F$  para cualquier formación en particular depende de la porosidad de la formación y de la distribución, del tamaño y de la estructura de los poros.

### 3.7 Relación entre la porosidad y el factor de formación

A partir de resultados de laboratorio, Archie (1942) propuso una relación entre el factor de formación y la porosidad de la siguiente manera:

$$F = \frac{a}{\phi^m} \quad \text{Ecuación 5}$$

donde

$a$ : Constante empírica

$m$ : Factor de cementación

Algunos autores como Humble recomiendan las siguientes relaciones entre  $F$  y  $\phi$ .

$$F = \frac{0,62}{\phi^{2,15}} \quad \text{Para arenas no consolidadas. Ecuación 5.1}$$

$$F = \frac{0,81}{\phi^2} \quad \text{Para arenas compactas. Ecuación 5.2}$$

$$F = \frac{1}{\phi^2} \quad \text{Para carbonatos. Ecuación 5.3}$$

### 3.8 Perfiles eléctricos de pozo

Los perfiles o registros de pozo son mediciones de las propiedades del subsuelo y/o del pozo de acuerdo a la profundidad. Estos registros permiten determinar la profundidad y el espesor de las unidades de interés y su correlación entre pozos, propiedades petrofísicas de la roca (porosidad, volumen de arcillas), tipo de fluido presente, la geometría del pozo y propiedades mecánicas de los estratos entre otras.

Para un mismo pozo se pueden realizar uno o más perfiles. De estos se obtienen curvas que se grafican en diferentes pistas que se enumeran de izquierda a derecha como 1, 2, 3, etc. El nombre de cada curva, la escala (lineal o logarítmica) y el tipo de representación se detalla en la sección superior de cada pista. En el eje vertical se indica la profundidad, que puede ser graficada a la izquierda o entre las pistas 1 y 2. Las escalas habituales de profundidad son 1:200 y 1:1000, aunque suelen utilizarse las escalas 1:500 y 1:40.

En la figura 3.6 se representa un set de perfiles entre 35 y 195 mbbp, organizados en cuatro pistas.

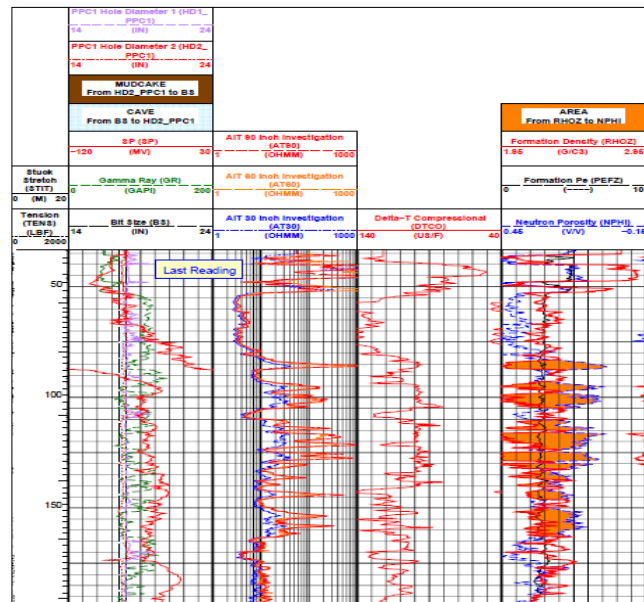


Figura 3.6. Ejemplo de perfiles organizados en cuatro pistas y profundidad indicada.

### **3.8.1 Ambiente de los registros**

La lectura realizada por los perfiles eléctricos depende de las condiciones del pozo, de las características del lodo utilizado durante la perforación, la profundidad de la invasión, la geometría del pozo y la temperatura de la formación.

Las características del lodo de perforación que deben ser tenidas en cuenta son: tipo de lodo, salinidad, densidad, aditivos y filtrado.

El lodo puede ser en base de agua dulce, salado o en base petróleo. Con el primero de estos se pueden correr todos los perfiles. El registro de potencial espontáneo y los registros de resistividad se ven afectados cuando al lodo se le agregan sales como el KCl. Si se utiliza un lodo base petróleo se utilizan perfiles de resistividad adaptados a este tipo de lodo, pero en el caso de los perfiles sónico, densidad y rayos gamma se pueden registrar sin inconvenientes.

Una de las funciones de lodo es evitar que el pozo se descontrole o desmorone, así la presión hidrostática de la columna del lodo debe ser mayor que la presión de las formaciones y para que esto ocurra la densidad del lodo debe ser adecuada y varía de acuerdo al pozo. Cuando se agregan aditivos para aumentar la densidad suelen afectar la respuesta de los registros sensibles a elementos pesados.

Durante la perforación el lodo invade las formaciones y el filtrado del lodo permite determinar la profundidad de la invasión y el espesor del revoque que se forma en la pared del pozo. El filtrado se mide en  $\text{cm}^3$  cada 30 minutos. Los registros que miden la resistividad de la formación no alterada están afectados cuando aumenta la profundidad de invasión, por otra parte el espesor del revoque puede causar problemas en aquellas herramientas que se apoyan mediante un patín en la pared del pozo.

Cuando la presión de la columna de lodo es mayor a la de la formación se produce la invasión. Esto quiere decir que el fluido de perforación entra en las formaciones más permeables, por otra parte las partículas sólidas del lodo se depositan en la pared del pozo formando un revoque de muy baja permeabilidad que a su vez impide que continúe la invasión.

De acuerdo a la profundidad de la invasión, se diferencian tres zonas en los alrededores del pozo:

**Zona lavada:** Es la región más próxima al pozo donde el lodo desplaza la mayor parte de los fluidos presentes en la formación, por lo tanto la salinidad en esta zona es prácticamente igual a la del filtrado.

**Zona invadida:** Es la zona contigua a la lavada y donde el desplazamiento de los fluidos de formación por el lodo es menor. En este sector hay una transición de la salinidad, entre la del filtrado y la de los fluidos originales.

La profundidad de las zonas lavada e invadida depende de las características del lodo de perforación, la porosidad y permeabilidad de la formación y del tiempo transcurrido desde que se inició la perforación.

La región adyacente a las anteriores, donde ya no hay presencia de filtrado de lodo se denomina **zona no invadida o virgen**.

En la figura 3.7 se esquematiza un modelo de pozo con las diferentes zonas de las que van a depender las respuestas de los registros.

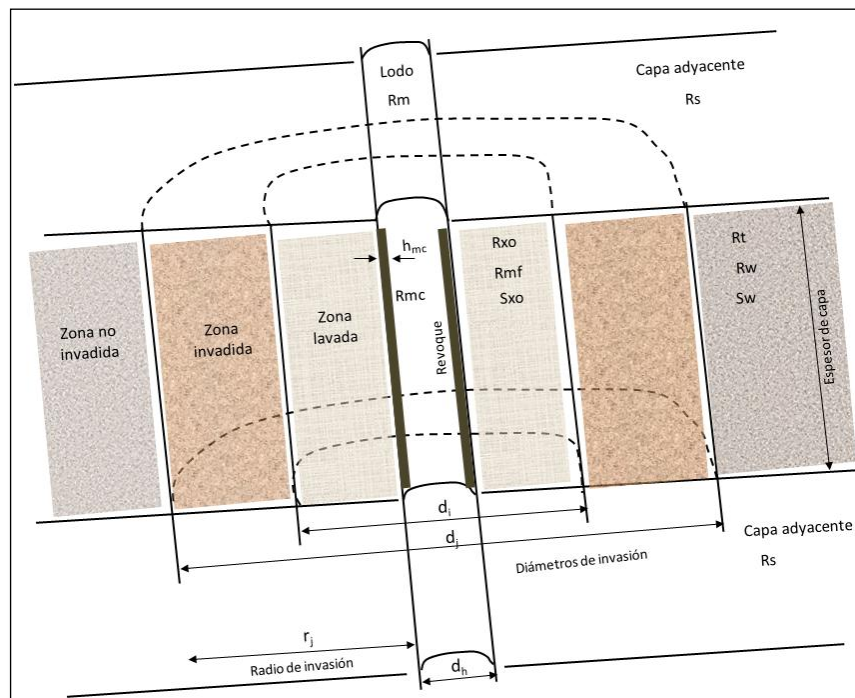


Figura 3.7. Modelo esquemático de un pozo y la formación estudiada para describir la respuesta de los perfiles.

La nomenclatura utilizada en el esquema de la figura 3.7 es la siguiente:

$R_t$ : Resistividad de la zona no invadida

$R_{x0}$ : Resistividad de la zona lavada

$R_s$ : Resistividad de la capa adyacente

$R_w$ : Resistividad del agua en la zona no invadida

$R_{mf}$ : Resistividad del filtrado

$R_{mc}$ : Resistividad del revoque

$R_m$ : Resistividad del lodo

$d_h$ : Diámetro del pozo

$h_{mc}$ : Espesor del revoque

Si se utiliza un lodo de agua dulce la distribución radial de resistividades en una zona acuífera se puede esquematizar de acuerdo a la figura 3.8 Como la zona virgen está 100 % saturada de agua  $R_t = R_o = F \cdot R_w$ . En la región lavada  $R_{x0} = F \cdot R_{mf}$  porque predomina la resistividad del filtrado. En la zona invadida la resistividad cambia de  $R_{x0}$  a  $R_t$  debido a la variación de salinidad entre la del filtrado y la del agua de formación.

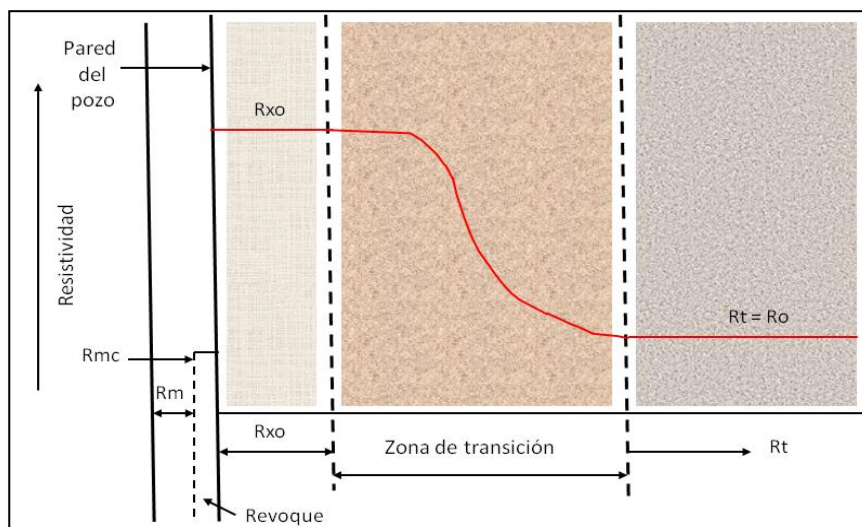


Figura 3.8. Distribución radial de resistividades en una zona acuífera.

### 3.8.2 Registro de Potencial Espontáneo (SP)

La curva de potencial espontáneo registra la diferencia de potencial en milivolts (mV) entre un electrodo móvil en el pozo y otro en superficie de acuerdo a la profundidad. Este fenómeno se produce en el pozo de manera natural y depende de las actividades químicas de los fluidos presentes en el sondeo y en las formaciones adyacentes, de la temperatura y del tipo de arcillas presentes.

Este registro es útil cuando se utilizan lodos en base agua y se puede utilizar para:

- \*Diferenciar rocas porosas y permeables de rocas no permeables o lutitas.
- \*Ubicar límites y correlacionar unidades.
- \*Determinar la resistividad del agua de formación ( $R_w$ ).
- \*Proporcionar valores cualitativos del contenido arcilloso de una determinada unidad.

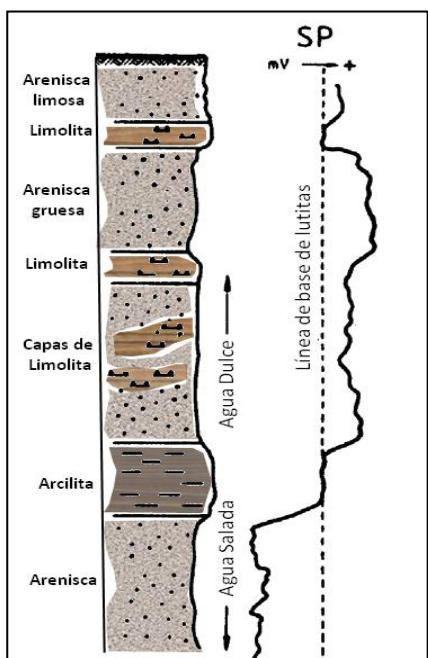


Figura 3.9. Representación de la curva de Potencial Espontáneo de acuerdo a la litología y variación de la línea de base de lutitas. Modificado de Wonik & Hinsby, 2006.

Cuando la herramienta atraviesa capas de lutitas no se observan deflexiones de la curva SP y los valores mínimos de esta conforman una línea denominada línea de base de lutitas que corresponde al valor cero del registro de potencial espontáneo. En algunos registros se observan desplazamientos de la línea de base de las lutitas, debido a que aguas de formación de diferentes salinidades están separadas por una capa de arcilitas o lutitas que no actúan como membranas perfectas (Fig. 3.9)

El potencial espontáneo se produce por la combinación de dos fenómenos, uno electrocinético (normalmente despreciable) y otro electroquímico cuyos componentes son el potencial de membrana y el potencial de juntura líquida.

Para el caso de la figura 3.9, las deflexiones hacia la derecha de la curva de SP indican que el agua de formación es menos salada que el filtrado del lodo. Cuando la curva defleciona a la izquierda sucede lo contrario, el agua de formación es más salina.

### 3.8.3 Registro de Rayos Gamma (GR)

Este tipo de registros miden la radioactividad natural de las rocas (en grados API), por lo que resulta útil para detectar minerales como potasio (K), uranio (U) y torio (Th), los cuales suelen acumularse en arcillas y lutitas. Por esto, en el caso de las cuencas sedimentarias, el perfil de GR permite realizar una estimación del contenido de arcillas, debido a que las areniscas generalmente poseen una radioactividad muy baja o nula, que depende de su contenido en feldespatos alcalinos, micas, ceniza volcánica o fragmentos ígneos radioactivos.

El resultado de la detección de los rayos gamma emitidos por el K, U y Th, es la generación de una curva (Fig. 3.10) cuyos valores mínimos (GR limpio) corresponden a formaciones con muy bajo o nulo contenido de arcillas, mientras que los valores mayores

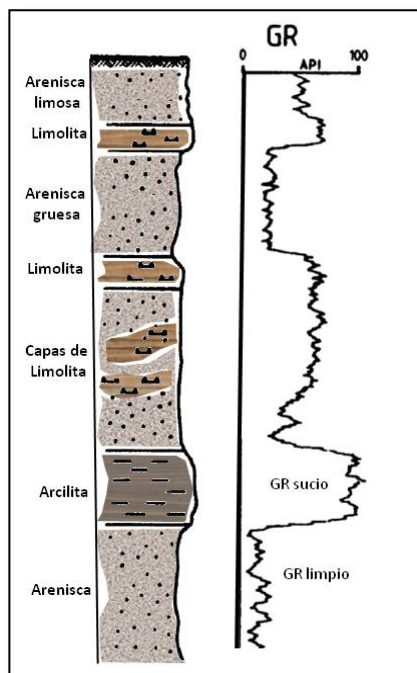


Figura 3.10. Representación de la curva de GR de acuerdo a la litología presente. Modificado de Wonik y Hinsby, 2006.

(GR sucio) representan unidades con mayor contenido de arcillas.

### 3.9 Estimación del Volumen de Arcillas a partir el perfil de Rayos Gamma

Uno de los usos más importantes del perfil de rayos gamma es la estimación de arcillosidad.

El cálculo cuantitativo de la proporción de arcillas en un intervalo dado se realiza mediante la siguiente ecuación:

$$V_{sh} = \frac{GR - GR_{min}}{GR_{max} - GR_{min}} \quad \text{Ecuación 6}$$

En este caso GRmin es el valor de rayos gamma que corresponde a formaciones limpias y GRmax el que corresponde a arcillas o lutitas y GR es la lectura del

registro en el punto de interés.

Las limitaciones de este método son:

\*Puede no haber formaciones limpias en el intervalo estudiado, por lo cual se utiliza un valor arbitrario de GRmin.

\*El volumen de arcilla calculado es mayor al real cuando las formaciones contienen minerales radioactivos, por ejemplo micas y feldespatos alcalinos.

\*No se observa un contraste marcado entre arenas y arcillas, cuando estas últimas no contienen potasio (kaolinita, montmorillonita).

### 3.9.1 Registros de Inducción y con Electrodo Enfocado

Los lateroperfiles y perfiles con enfoque esférico son registros con electrodos enfocados que utilizan corrientes enfocadas para controlar la trayectoria de la corriente de medición a profundidades de investigación que pueden ser someras, medianas o muy profundas.

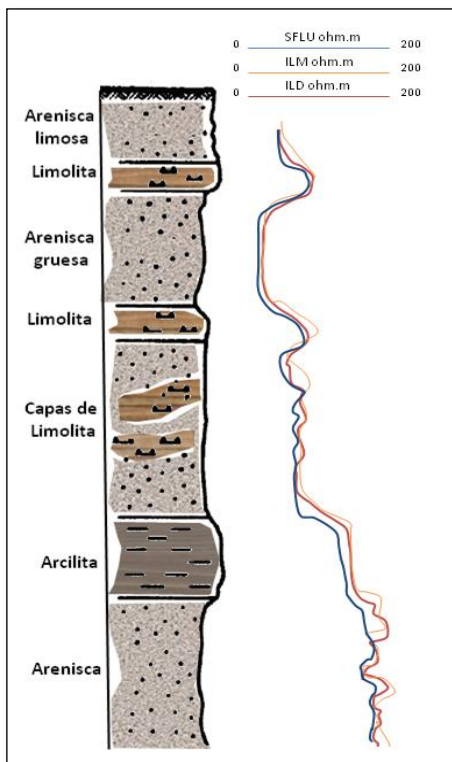


Figura 3.11. Ejemplo de registro de inducción y laterolog para medir valores de resistividad somera, intermedia y profunda. Modificado de Wonik y Hinsby, 2006.

Poseen mayor resolución en capas delgadas o moderadamente gruesas y permiten determinar  $R_t$  y  $R_{x_0}$ . Este tipo de registros también poseen dispositivos enfocados que permiten medir valores de resistividad somera, intermedia y profunda más exactos (Fig. 3.11).

### 3.10 Cálculo de $R_w$ por Archie y estimación de la Salinidad

Los registros de resistividad permiten determinar el factor de formación (F), que se define como la relación que existe entre la resistividad de la roca y el fluido que alberga en sus poros.

El factor de formación es una función de la porosidad ( $\phi$ ), de la estructura poral y de la distribución de poros por su tamaño (Archie, 1942). Si se considera que la formación está 100 % saturada

de agua ( $S_w = 100\%$ ),  $R_t$  (resistividad verdadera de la formación) es igual a  $R_o$  y  $R_w = R_{wa}$ , entonces:

$$R_w = R_{wa} = \frac{R_t}{F} \quad \text{Ecuación 7}$$

Reemplazando  $F$  de acuerdo a las ecuaciones 4 y 5:

$$R_w = R_t * \phi^{m*1/a} \quad \text{Ecuación 8}$$

Una vez obtenido el valor de  $R_w$ , la salinidad se calcula utilizando la ecuación 9, tal como describe el método empleado por la Comisión Nacional del Agua (2007).

$$\text{Salinidad} = 10^x \quad \text{Ecuación 9}$$

donde:

$$x = \frac{[3,562 - \log (R_w - 0,0123)]}{0,955} \quad \text{Ecuación 10}$$

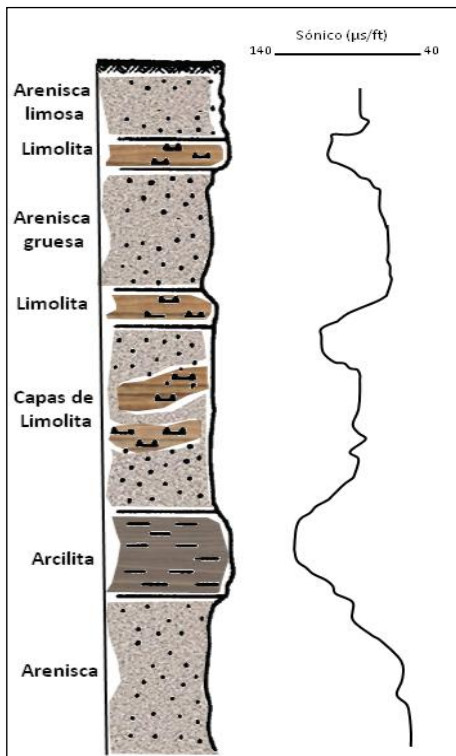


Figura 3.12. Comportamiento del registro sísmico de acuerdo a la litología presente. Modificado de Wonik y Hinsby, 2006.

### 3.10.1 Registro Sísmico

Este tipo de registro consta de una herramienta con un transmisor que emite un pulso de sonido y un receptor que toma y registra el pulso. De esta manera se registra  $\Delta t$  (tiempo de tránsito) en función de la profundidad, esto significa que se mide el tiempo requerido por una onda compresional de sonido para recorrer una distancia de un pie en la formación (Fig. 3.12).

El tiempo de tránsito en las rocas matrices disminuye con el aumento de la porosidad (aumenta  $\Delta t$ ), debido a que el sonido se propaga a una velocidad mucho menor en los líquidos o el gas alojados en los poros que en las rocas. Por esto, si se conoce la litología y el tiempo de tránsito a través de

la matriz presente, el perfil sónico permite determinar la porosidad de la formación de interés.

### 3.11 Cálculo de Porosidad con el perfil Sónico

Mediante experimentos de laboratorio Wyllie et. al. (1958) observó que la velocidad máxima alcanzada (*terminal velocity*) por una onda a través de una roca, dependía de la porosidad y de las velocidades de la roca y el fluido presente, por lo cual describió esa relación en términos de lentitud mediante la siguiente ecuación:

$$\Delta t = \phi \Delta t_f + (1 - \phi) \Delta t_{ma} \quad \text{Ecuación 11}$$

Entonces:

$$\phi = \frac{\Delta t - \Delta t_{ma}}{\Delta t_f - \Delta t_{ma}} \quad \text{Ecuación 12}$$

donde:

$\Delta t$ : Lectura del registro sónico

$\Delta t_f$ : Tiempo de tránsito del fluido; generalmente se usa 189  $\mu\text{s}/\text{ft}$

$\Delta t_{ma}$ : Tiempo de tránsito de la matriz. Los valores más frecuentes se muestran en la tabla A1.1 (Anexo 1).

La ecuación 12, también llamada de Wyllie, es válida para formaciones limpias y consolidadas con pequeños poros distribuidos de manera uniforme. Para el caso de arenas no consolidadas o insuficientemente compactadas se obtienen valores de porosidad muy altos, esto se debe a una disminución de la velocidad del sonido en la formación porque la presión de confinamiento es menor a la necesaria para que se cumpla la ley de tiempos promedio de Wyllie. En general se considera que no hay suficiente compactación cuando en las lutitas adyacentes el valor de  $\Delta t$  es mayor a 100  $\mu\text{s}/\text{ft}$ . Cuando esto sucede se aplica a la ecuación 12 un factor de corrección empírico  $C_p$ , cuyo valor varía entre 1 y 1,5, quedando de la siguiente forma:

$$\phi_c = \frac{\Delta t - \Delta t_{ma}}{\Delta t_f - \Delta t_{ma}} * \frac{1}{C_p}$$

Ecuación 13

### 3.12 Calidad del agua

#### 3.12.1 Agua Potable

Según el artículo 982 (Resolución Conjunta SPRyRS y SAGPyA N° 68/2007 y N° 196/2007) del Código Alimentario Argentino, el **agua potable** se define como:

“Con las denominaciones de agua potable de suministro público y agua potable de uso domiciliario, se entiende la que es apta para la alimentación y uso doméstico: no deberá contener sustancias o cuerpos extraños de origen biológico, orgánico, inorgánico o radiactivo en tenores tales que la hagan peligrosa para la salud. Deberá presentar sabor agradable y ser prácticamente incolora, inodora, límpida y transparente. El agua potable de uso domiciliario es el agua proveniente de un suministro público, de un pozo o de otra fuente, ubicada en los reservorios o depósitos domiciliarios. Ambas deberán cumplir con las características físicas, químicas y microbiológicas siguientes:

#### 3.13 Características físicas:

- Turbiedad: máx. 3 N T U;
- Color: máx. 5 escala Pt-Co;
- Olor: sin olores extraños.

#### 3.14 Características químicas:

- pH: 6,5 - 8,5;
- pH sat.: pH ± 0,2.

##### 3.14.1 Agua Dulce

El agua dulce es la que contiene cantidades mínimas de sales disueltas y proviene de la precipitación del vapor de agua atmosférico o del derretimiento de la nieve o hielo.

Considerando el movimiento del agua dentro del ciclo el hidrológico, el agua de lluvia que infiltra en el subsuelo tiene escaso contenido iónico, el cual aumenta al paso del

agua a través de las zonas no saturada y saturada, donde se produce la interacción del agua con la fase sólida y líquida del terreno que atraviesa.

En cuanto a las sustancias químicas presentes en el agua dulce, predominan las que se encuentran en forma de iones, aunque en menor medida pueden ocurrir como moléculas o iones complejos de sustancias orgánicas e inorgánicas.

De acuerdo a la concentración, los iones pueden clasificarse como:

### **3.15 Componentes mayoritarios (mayor a 5 mg/L)**

- Cloruros ( $\text{Cl}^-$ )
- Sulfatos ( $\text{SO}_4^{-2}$ )
- Bicarbonatos ( $\text{HCO}_3^-$ )
- Sodio ( $\text{Na}^+$ )
- Calcio ( $\text{Ca}^{+2}$ )
- Magnesio ( $\text{Mg}^{+2}$ )

### **3.16 Componentes minoritarios (menor a 5 mg/L)**

- Nitrato ( $\text{NO}_3^-$ )
- Carbonato ( $\text{CO}_3^{-2}$ )
- Nitrito ( $\text{NO}_2^-$ )
- Flúor ( $\text{F}^-$ )
- Potasio ( $\text{K}^+$ )
- Hierro (II) ( $\text{Fe}^{+2}$ )
- Amonio ( $\text{NH}_4^+$ )
- Estroncio ( $\text{Sr}^{+2}$ )

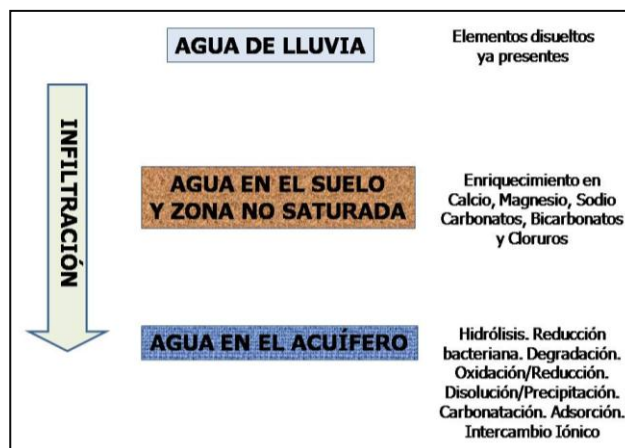
Por otra parte, los componentes minoritarios y mayoritarios disueltos en el agua, pueden sumar en conjunto un amplio rango de concentraciones. De esta manera, las aguas dulces poseen menos de 1000 mg/L, las aguas salobres hasta 5000 mg/L y las aguas marinas alcanzan los 35000 mg/L.

### 3.16.1 Evolución del agua

El camino que recorre el agua desde que precipita hasta que infiltra y se acumula en los acuíferos, va a determinar la especie de iones disueltos. Lillo (2007) propone un esquema donde muestra que iones se incorporan al agua y los procesos que ocurren en las diferentes etapas.

Desde que se produce la precipitación hasta el momento en que se almacena el agua en acuíferos o que se comunica con un río, manantial o captación, puede existir un recorrido que alcance varios kilómetros y en periodos de tiempo de hasta miles de años. De esta manera el contenido iónico del agua depende de las características mineralógicas de las rocas con las que esté en contacto y del tiempo.

Las reacciones y procesos químicos que se producen son muy variados, tal como se observa en el esquema de la figura 3.13. De esta manera, generalmente se observa que las aguas subterráneas con menor tiempo de permanencia en el subsuelo son principalmente bicarbonatadas, mientras que aquellas cuyo tiempo de residencia es mayor son generalmente cloruradas. Esta evolución se denomina Secuencia de Chevotareb (1955).



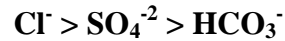
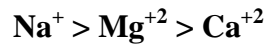
3.13. Procesos que modifican la composición química del agua

La **Secuencia de Chevotareb** resulta de buena aplicación en cuencas sedimentarias de gran extensión y profundas. Así propone la siguiente evolución de iones de un agua ‘joven’ a una con mayor tiempo de residencia:

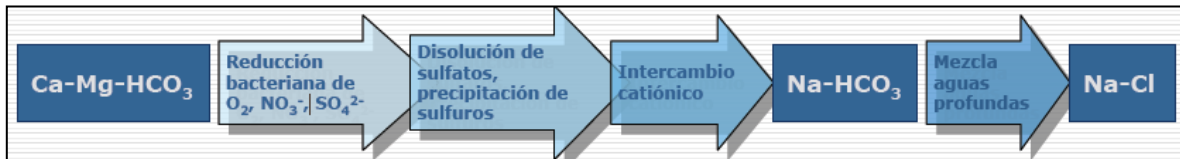
Concentración de iones en aguas de reciente infiltración



Luego de un tiempo de residencia la secuencia suele invertirse de la siguiente manera:



Teniendo en cuenta los procesos que ocurren, la secuencia de Chevotareb se puede esquematizar como se muestra en la figura 3.14.



3.14. Evolución del agua de acuerdo a la Secuencia de Chevotareb. Lillo, (2007).

### 3.16.2 Representación de las características químicas del agua

Las características químicas del agua permiten obtener información sobre el origen y la distribución del agua subterránea, los procesos químicos y físicos a los que está sometida y la calidad en cuanto a la presencia de contaminantes. Con estos datos es posible estimar la evolución, vulnerabilidad y medidas para gestionar el recurso en un acuífero determinado en tiempo y espacio.

Las representaciones gráficas de los datos permiten realizar estimaciones sobre la evolución química del agua, su circulación regional y tiempo de residencia en el acuífero. Este tipo de gráficos pueden ser de columnas, radiales, verticales ó triangulares.

### 3.17 Diagramas de Piper-Hill-Langelier

Este tipo de diagrama representa la relación de proporciones entre tres componentes en la composición de una muestra de agua.

Está formado por dos triángulos equiláteros, uno representa la composición de aniones y el otro de cationes, con un campo romboidal en el centro en el que se diferencian las facies hidroquímicas (Fig. 3.15).

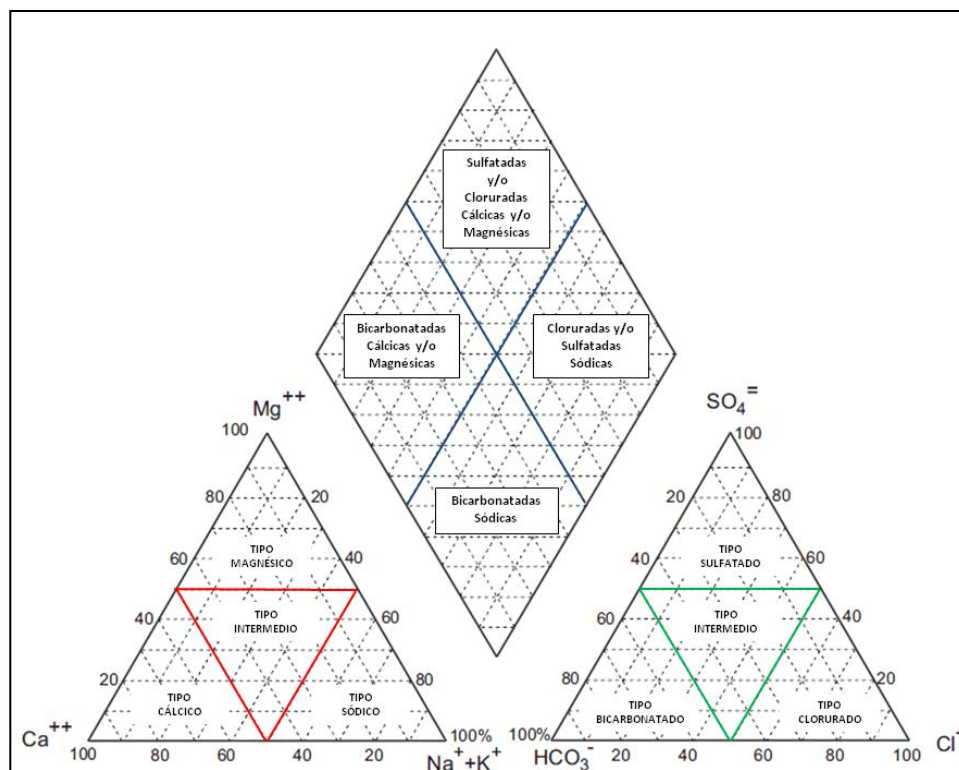


Figura 3.15. Diagrama de Piper-Hill-Langelier y sus respectivas facies hidroquímicas. Modificado de Sánchez San Román.

Este tipo de diagrama refleja la composición hidroquímica del agua permitiendo establecer de forma directa las facies hidroquímicas. Así, las facies presentes en el campo romboidal del centro son:

**Sulfatadas Cálcidas:** Típicas de drenaje de minas y aguas subterráneas en formaciones yesíferas.

**Bicarbonatadas Cálcidas:** Típicas de acuíferos someros de agua dulce.

**Cloruradas Sódicas:** Típicas de aguas marinas y aguas subterráneas muy antiguas.

**Bicarbonatadas Sódicas:** Típicas de acuíferos profundos de agua dulce, influenciados por intercambio iónico.

### 3.18 Diagrama de Stiff

El diagrama de Stiff consta de semirrectas paralelas divididas en segmentos proporcionales a la concentración de cada ión (meq/L) (Fig. 3.16). La distancia entre los ejes horizontales es arbitraria y la escala elegida depende de las características presentes en el agua de la región estudiada, por lo tanto la longitud y la escala se determinan a partir de las concentraciones más elevadas obtenidas a partir de los análisis.

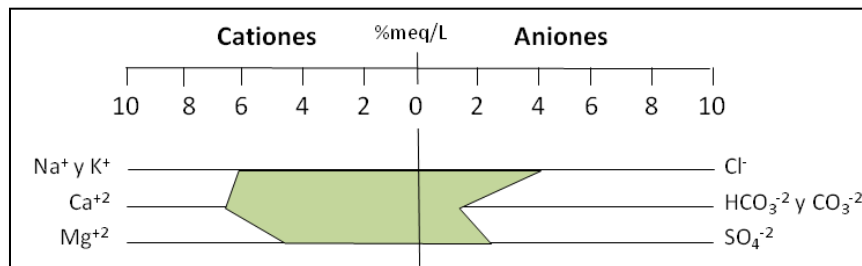


Figura 3.16. Representación de las concentraciones de cationes y aniones en un diagrama de Stiff.

Este tipo de diagrama permite observar los valores iónicos con respecto a la unidad y como varía la relación entre cationes y aniones de una muestra. Además, la forma de cada polígono permite realizar estimaciones sobre el tipo de agua (Fig. 3.17) y el grado de mineralización de la misma (ancho de los ejes horizontales).

La principal ventaja de este diagrama es la posibilidad de representarlo en un mapa, lo cual permite visualizar de manera rápida la distribución geográfica de los distintos tipos de agua.

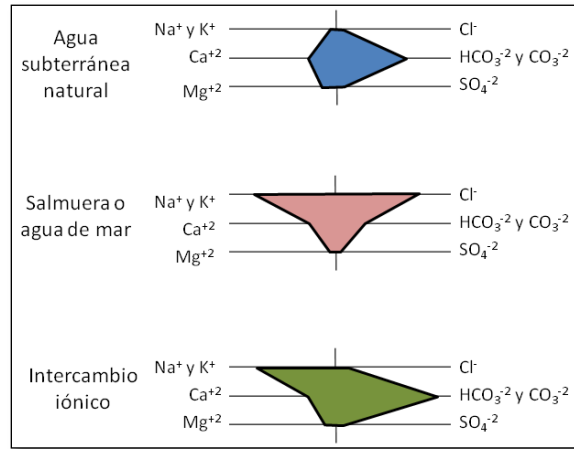


Figura 3.17. Tipos de agua según el diagrama de Stiff.

### 3.19 Importancia de la caracterización litológica en hidrogeología

Para realizar la identificación de las unidades de interés y definir los respectivos pases formacionales, se conjugaron diferentes herramientas.

Por un lado se reconocieron los afloramientos a partir de imágenes satelitales y del aporte de especialistas que han recorrido el sector de interés. Esto permitió determinar que rocas conforman la sección superior en los pozos seleccionados y en algunos casos ubicar el contacto entre las unidades.

Por otro lado se correlacionó esta información con la descripción de recortes de perforación y el comportamiento de los registros eléctricos de pozos cercanos, lo que permitió extrapolar dicha información al resto de los pozos en el área de estudio.

La distribución superficial y la ubicación del tope y base de las unidades de estudio son indispensables para confeccionar mapas geológicos, estructurales e isopáquicos. Dichos mapas resultan de interés debido a que la caracterización litológica en profundidad y la distribución geográfica de los depósitos son parámetros fundamentales que permiten definir las unidades hidrogeológicas presentes, estimar sus propiedades y la dinámica del movimiento del agua.

### 3.20 Tratamiento de la información

Para trabajar con los datos georeferenciados se utilizó el software *ArcGis* que permite almacenar los datos de los pozos, visualizar imágenes satelitales y realizar mapas geológicos, topográficos, hídricos, etc.

Se utilizó un software específico para el tratamiento e interpretación de perfiles eléctricos de pozo que permite realizar correlaciones entre pozos y cálculos sobre las lecturas de los registros eléctricos para obtener curvas que representen diferentes parámetros litológicos o características de las rocas y fluidos del tramo en el que se realizó el perfilaje.

Para el análisis químico del agua se utilizó *Diagramme 5.4* (Laboratorio de Hidrogeoquímica de la Universidad d'Avignon, Francia) que es un programa diseñado para el tratamiento e interpretación de datos hidroquímicos y permite realizar diagramas como el de Piper–Hill–Langelier y Stiff. Por otra parte, resulta útil para evaluar datos estadísticos (frecuencias, matrices de correlación), calcular el balance iónico y conductividad, simular neutralizaciones, dataciones de C 14 y determinar relaciones de O 18 y deuterio.

### **3.21 Información disponible**

Para evaluar las características litológicas y las aptitudes hidrogeológicas de la Formación Rayoso y del Grupo Neuquén en el sector centro – este de la Provincia del Neuquén, se utilizó la información de pozos de agua proveniente de diversas fuentes y de pozos hidrocarburíferos disponibles en la Dirección Provincial de Hidrocarburos y Energía (Subsecretaría de Energía, Minería e Hidrocarburo, Provincia del Neuquén). Además se contó con información aportada por especialistas a partir de diferentes charlas y consultas.

En la Provincia del Neuquén existen más de 13.000 pozos hidrocarburíferos. De los que están ubicados en el sector de la Cuenca del Bajo de Añelo, se eligieron 21 (Fig. 3.18). La selección de la cantidad de pozos estuvo sujeta a la calidad de la información disponible en cada uno de ellos. Por esto, se escogieron aquellos que contaban con alguno (y en algunos casos, todos) de los ítems listados a continuación:

- **Topes formacionales:** Indica la profundidad a la que se ubican los topes de las diferentes unidades estratigráficas en el pozo perforado. En la mayoría de los casos, los topes de las unidades en estudio no están presentes debido a que no poseen interés petrolero.

- Descripción de recortes de perforación (cutting): Se seleccionaron los pozos con descripciones litológicas desde boca de pozo o que abarcaran un tramo de las unidades en estudio.
- Partes de perforación: Se tuvieron en cuenta los partes en los que se identifican niveles, bajo boca de pozo, con entrada de agua durante la perforación.
- Análisis de muestras de agua: En algunos casos, donde se detectaba entrada de agua al pozo durante la perforación, se tomaba una muestra de esta para análisis químicos.
- Perfiles eléctricos de pozo.

Debido a que las unidades de estudio carecen de interés petrolero en el área seleccionada, menos del 15 % de los pozos utilizados para este TFL contienen descripciones de recortes de perforación y en el caso particular del área del Alto de Entre Lomas no se contó con ninguna y se utilizaron los esquemas de pozo disponibles.

No se tuvo un registro exacto de la cantidad de pozos de agua perforados en el área de estudio y solo se dispuso de la información de nueve de ellos (Fig. 3.18) que contaban con alguno de los siguientes datos:

- Litología atravesada
- Diseño del pozo
- Profundidad de los niveles acuíferos
- Niveles estático y dinámico
- Ensayos de bombeo
- Análisis hidroquímicos

Para la denominación de los pozos se utilizó una sigla seguida de un número. En el caso de los pozos de agua, se agregó una “w” (*water* = agua) como referencia. De esta manera, la sigla es la abreviatura de la región morfoestructural en la que se ubica el pozo y los números son consecutivos en toda el área de estudio.

Si bien algunos de los pozos no se ubican exactamente dentro de los límites de las regiones morfoestructurales señaladas, se consideró la región más cercana al momento de escoger la sigla correspondiente.

En Anexo 2 (tabla A2.1) se indican los pozos con coordenadas y cota topográfica.

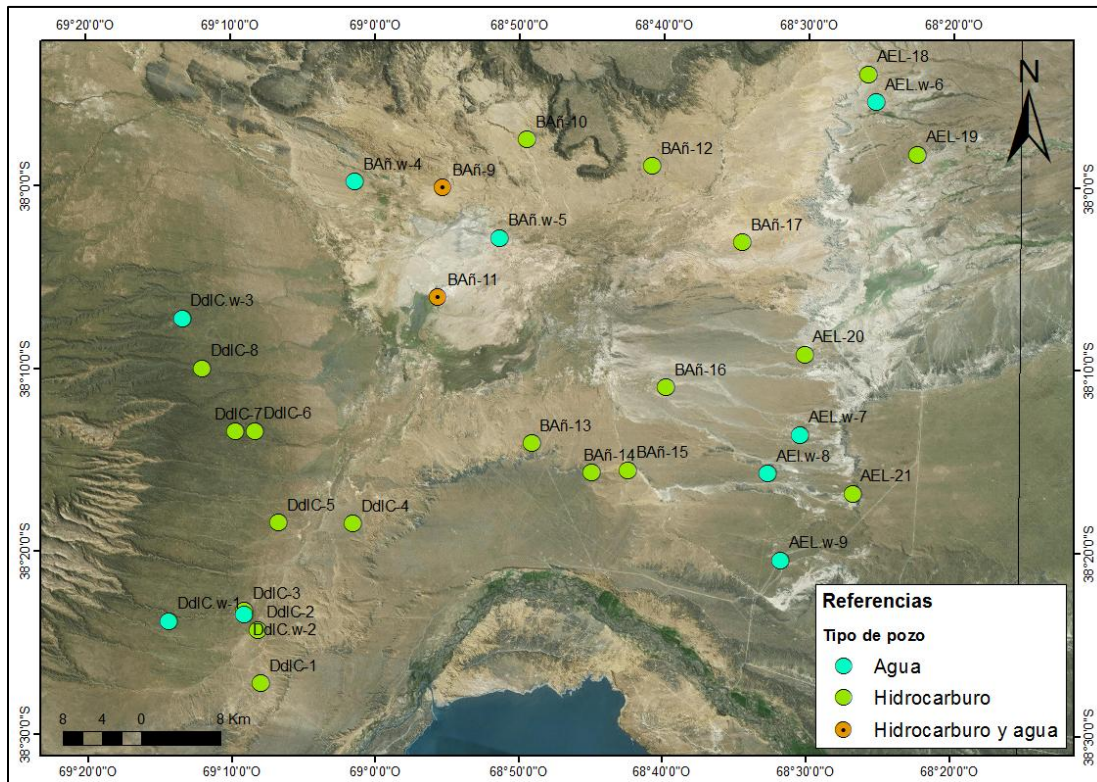


Figura 3.18. Distribución de pozos de agua e hidrocarbúferos seleccionados en el área de estudio.

## 4 CARACTERIZACION DEL AREA DE ESTUDIO

### 4.1 Ubicación geográfica

El área de estudio comprende la región centro este de la provincia del Neuquén, constituyendo una superficie aproximada de 4273 km<sup>2</sup>. Limita al norte con el volcán Auca Mahuida y con el río Neuquén al sur. El flanco oeste del Dorso de los Chihuidos es el límite oeste mientras que hacia el este el área de estudio se extiende hasta el límite provincial (Fig. 4.1).

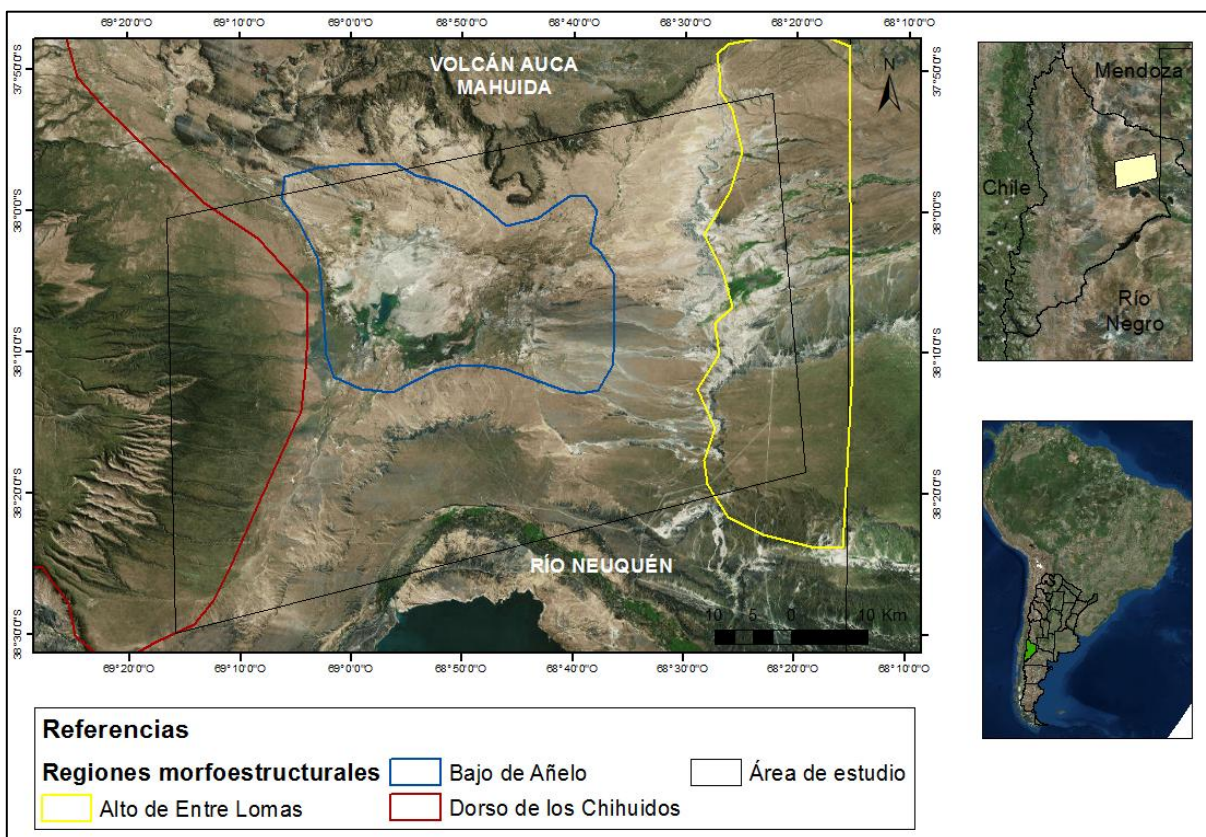


Figura 4.1. Ubicación del área de estudio y regiones morfoestructurales.

### 4.2 Cuenca Neuquina

La Cuenca Neuquina es un depocentro subandino localizado en el sur de Sudamérica con 7000 m de sedimentos jurásicos y cretácicos. Esta cubeta subandina se asocia a un margen de placas convergentes, una de naturaleza oceánica que formó parte del

océano proto-Pacífico y otra formada por corteza continental que constituyó el límite sudoccidental de Gondwana.

Su historia deposicional consiste en una sucesión cíclica de eventos marinos alternantes con etapas de continentalización. Durante el Cretácico Superior comenzó el alzamiento de la cordillera de los Andes y se produjo la desvinculación definitiva con el océano proto-Pacífico.

El conjunto de terrenos que constituyen el basamento de la cuenca son Cuyania, amalgamado en el Ordovícico Medio – Tardío (Astini, 1996), Chilenia (Ramos et al., 1986) que colisionó durante el Devónico Tardío y finalmente Patagonia (Ramos, 1984), integrado al resto de los mosaicos basamentales durante el Carbonífero Tardío o Pérmico Temprano (Rapalini et al., 2010), dando lugar a la provincia magmática Choiyoi, la cual forma parte del basamento de la cuenca.

El contexto geotectónico y la compleja historia de la Cuenca Neuquina están fuertemente controlados por cambios tectónicos en el margen oeste de Gondwana. La evolución y desarrollo de la cuenca puede ser resumida en tres etapas:

### **4.3 Triásico Tardío – Jurásico Temprano**

#### **Fase de synrift**

Previo al comienzo de la subducción en el margen oeste, este sector de Gondwana estuvo caracterizado por grandes sistemas de fallas transcurrentes. Esto dio lugar a una tectónica extensional y a la evolución de una serie de depocentros aislados (Manceda & Figueroa, 1995; Vergani et al., 1995; Franzese & Spalletti, 2001), en los cuales se acumuló un complejo arreglo de depósitos clásticos de sistemas aluviales, fluviales, marino-someros, deltaicos y lacustres (Franzese & Spalletti, 2001) junto con acumulaciones volcanoclásticas y extensos flujos de lava (Franzese et al., 2006) (Fm. Lapa y unidades equivalentes) (Fig. 4.2).

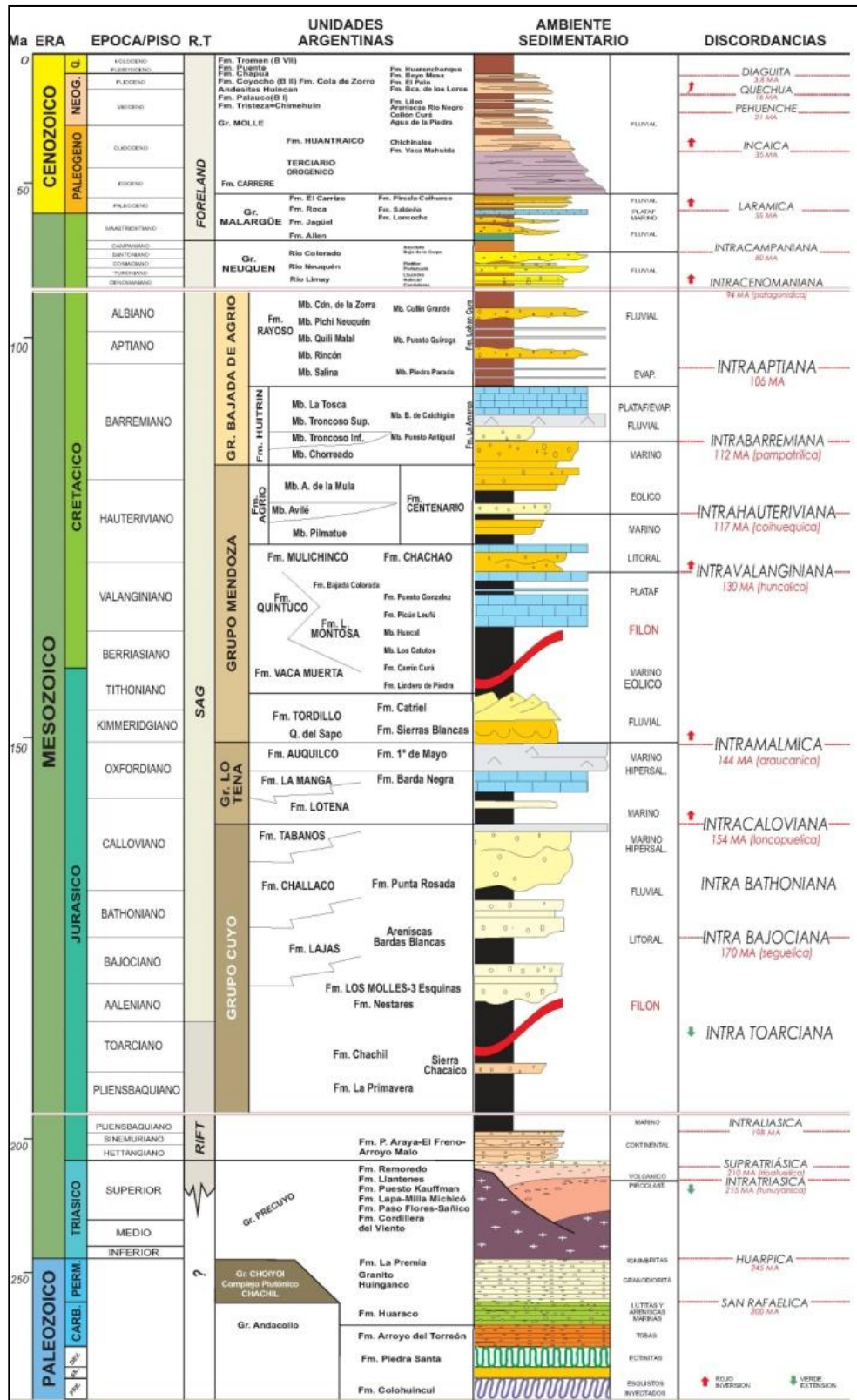


Figura 4.2. Evolución y columna estratigráfica de la Cuenca Neuquina. Fuente: Petrobras.

#### **4.4 Jurásico Temprano – Cretácico Temprano**

##### **Etapa de post-rift**

Durante el Jurásico Temprano-Medio se desarrolló un margen de subducción activo al oeste de Gondwana (Franzese et al., 2003) y hacia el Jurásico Tardío el arco magmático de los Andes ya estaba bien desarrollado.

La subsidencia durante este periodo, dio lugar a una inundación marina en la cuenca desde el océano proto-Pacífico a través de pasajes en el arco volcánico (Spalletti et al., 2000; Macdonald et al., 2003).

Luego de este periodo inicial, comenzó la fase evolutiva más importante de la Cuenca Neuquina en la que se depositaron sucesiones de gran espesor y amplia distribución, las cuales corresponden a complejas series de ciclos transgresivos-regresivos de diferente magnitud, que estuvieron controlados por la combinación entre los cambios en la tasa de subsidencia, levantamientos localizados y oscilaciones del nivel eustático (grupos Cuyo, Lotena y Mendoza, Fig. 4.2).

#### **4.5 Cretácico Tardío – Cenozoico**

##### **Compresión y cuenca de antepaís**

Hacia fines del Cretácico Temprano, los cambios en las tasas de separación y reorganización de las placas Sudamericana y Pacífica junto con la disminución en el ángulo de subducción, resultaron en el desarrollo de un régimen tectónico compresivo causando inversión de estructuras extensionales previas (Vergani et al., 1995). En este punto, la Cuenca Neuquina adquirió la configuración de una cuenca de retroarco - antepaís, provocando la migración de los depocentros hacia el este (Franzese et al., 2003).

El levantamiento e inversión de la cadena montañosa hacia el oeste dio lugar a la acumulación de más de 2000 m de depósitos continentales en los principales depocentros (Formación Rayoso y Grupo Neuquén, Fig 4.2) (Legarreta & Uliana, 1991, 1999; Vergani et al., 1995). A fines del Cretácico, producto de un periodo en el que el nivel de base global se encontraba muy elevado, se produjo una transgresión marina del Océano Atlántico, resultando en depósitos marino-someros sobre amplias áreas de la cuenca (Barrio, 1990).

Durante la etapa de antepaís, se desarrollaron varias fajas plegadas y corridas, tanto de piel fina como de piel gruesa (Ramos, 1999), y su posición constituye el principal control en la fisiografía actual en la región de Neuquén.

Por otra parte, el régimen compresivo no fue continuo a través del tiempo. Zapata & Folguera (2005) identificaron diferentes estadios de compresión y relajación durante la evolución de la Faja Plegada y Corrida de los Andes durante el Cretácico Tardío y el Cenozoico.

#### **4.5.1 Estratigrafía**

La Cuenca Neuquina posee un espesor de 7.000 m de sedimentos acumulados desde el Triásico al Terciario. El relleno Mesozoico se divide en siete grupos principales: Precuyo, Cuyo, Lotena, Mendoza, Bajada del Agrio, Neuquén y Malargüe (Fig. 4.2).

Los depósitos más antiguos pertenecen al Grupo Precuyo y se trata de acumulaciones de rocas volcánicas, volcanoclásticas y clásticas asociadas, que a su vez están limitadas por dos discordancias, la intra-Triásica a la base (215 Ma) y la intra-Liásica al tope (208 Ma). Estas unidades fueron depositadas en grabenes aislados formados en un periodo de 7 a 10 Ma en el Jurásico Inferior (Hetangiano – Sinemuriano). Su espesor varía desde 200 m en el depocentro Medanito, hasta 3000 m en grabenes profundos como en Estancia Vieja a lo largo de la Dorsal de Huincul.

Los siguientes depósitos constituyen secuencias sedimentarias, donde los primeros cuatro grupos están asociados a transgresiones marinas desde el proto-océano Pacífico antes del levantamiento de la Cordillera de los Andes. El primero es el Grupo Cuyo (Pliensbachiano – Bathoniano), e incluye lutitas marinas profundas ricas en materia orgánica de la Formación Los Molles, depósitos marinos someros a deltaicos de la Formación Lajas y acumulaciones fluviales de las formaciones Punta Rosada y Challacó. El siguiente es el Grupo Lotena, constituido por las evaporitas de la Formación Auquilco, los carbonatos de la Formación La Manga y los depósitos clásticos deltaicos a marino someros de la Formación Lotena. El tercero es el Grupo Mendoza (Kimeridgiano tardío – Barremiano), constituido por las areniscas continentales de la Formación Tordillo, margas marinas profundas ricas en materia orgánica de la Formación Vaca Muerta, los carbonatos

de la Formación Quintuco, sedimentos marino someros de la Formación Mulichinco y clásticos marinos de la Formación Agrio. El cuarto es el Grupo Bajada Colorada (Aptiano – Albiano), formado por depósitos evaporíticos y clásticos de las formaciones Huitrín y Rayoso.

El resto son depósitos sinorogénicos que documentan el levantamiento de los Andes en esas latitudes. El Grupo Neuquén (Cenomaniano–Campaniano) constituye sedimentos molásicos continentales. El levantamiento de los Andes comenzó en el Cretácico Superior, tal como fue demostrado por la datación de zircones de la sección inferior del Grupo Neuquén ( $88 \pm 3.9$  Ma) en la Formación Huincul en el Cerro Policía (ver Corbella et al., 2004). El suprayacente Grupo Malargüe (Mastritchiano – Paleoceno) está compuesto por depósitos marino someros que fueron depositados a partir de la primer transgresión marina proveniente del Océano Atlántico.

Por último, depósitos sinorogénicos del Eoceno y Mioceno, y volcánicos del Plioceno completan el registro sedimentario.

#### **4.5.2 Unidades Morfoestructurales**

La configuración morfoestructural actual del Engolfamiento de la Cuenca Neuquina, es principalmente el resultado de la reactivación del Mioceno. Se han identificado siete unidades morfoestructurales y fueron clasificadas en tres grupos: la faja plegada y corrida, la región de antepaís y el sistema de Huincul (Fig 4.3).

El grupo de la faja plegada y corrida incluye la fosa de Loncopué, la faja plegada y corrida del Agrio, la Cordillera patagónica y la cuenca de Collón Curá. La región de antepaís comprende las unidades sin deformación, tales como la plataforma Patagónica estable y las regiones de cuenca de antepaís fragmentado. El sistema de intraplaca de Huincul intersecta tanto a los grupos de la faja plegada y corrida como a los de la cuenca de antepaís.

La región norte del antepaís fragmentado incluye los sistemas de Chihuidos y Entre Lomas, los cuales están separados por el Bajo de Añelo. Esta subdivisión está basada en

diferencias en las geometrías estructurales y orientaciones que reflejan historias tectónicas diferentes.

En la figura 4.3 las estructuras principales del Engolfamiento están basadas en información sísmica y evidencias del área, las que están ubicadas en el área de faja plegada y corrida de acuerdo a Herrero Ducloux (1946) y publicaciones posteriores. La línea discontinua SS1 corresponde a la localización de la línea sísmica de la figura 4.4, mientras que la línea discontinua de mayor trazo muestra el límite del Engolfamiento.

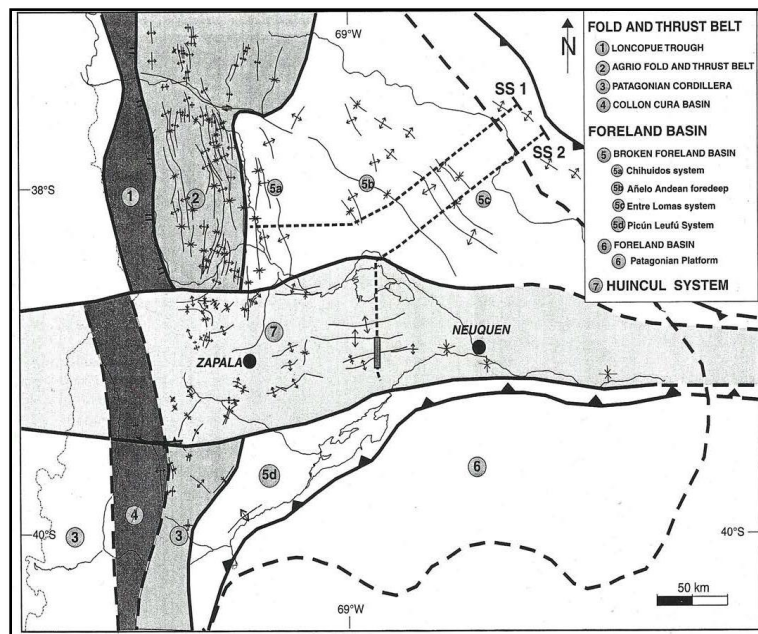


Figura 4.3. Principales unidades morfoestructurales de la Cordillera Principal y del Engolfamiento Neuquino. Mosquera y Ramos, (2005).

El sistema de fallas Chihuidos – Entre Lomas tiene un rol fundamental en la historia tectónica del Engolfamiento Neuquino. Ambos sistemas estuvieron caracterizados por una continua actividad tectónica durante el Jurásico y el Cretácico, pero con diferentes regímenes de estrés local, lo que resultó en diferentes historias de levantamiento. Este sistema de fallas está separado por el Bajo de Añelo, el cual estuvo afectado por periodos de deformación activa y quietud durante el Mesozoico.

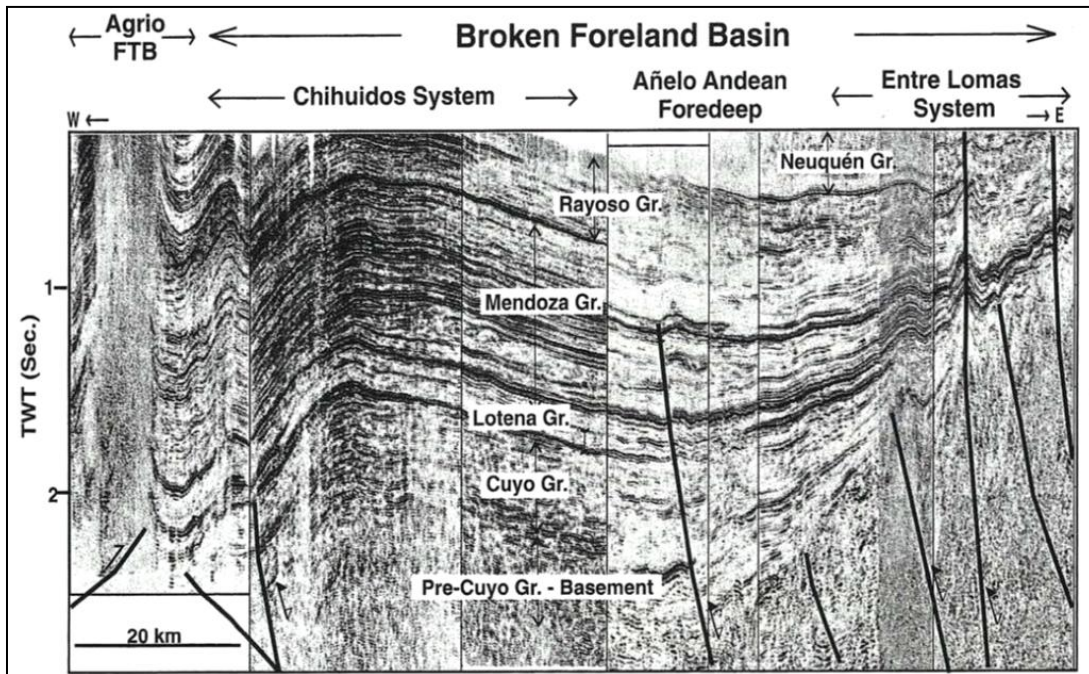


Figura 4.4. Sección sísmica regional SS1, a lo largo de la región más oriental de la faja plegada y corrida del Agrio y el sistema Chihuidos - Entre Lomas. La localización de la sección SS1 se indica en la figura 4.3. Mosquera y Ramos, (2005).

#### 4.6 Dorso de los Chihuidos

El Dorso de los Chihuidos es un alto estructural de unos 110 km de largo y orientación nor-noroeste (Fig. 4.1). Su expresión morfológica superficial muestra una zona elevada de aproximadamente 65 km de ancho, sin embargo, la zona elevada por encima del nivel regional para unidades cretácicas es cercana a los 100 km en forma perpendicular al eje del Dorso. Si se observa una imagen satelital de la región, se puede notar que la morfología del dorso indica un levantamiento muy reciente. El carcavamiento radial en su terminación sur y la topografía subparalela a la estratificación son indicativos de esta situación. A su vez, los arroyos que drenan la terminación sureste del dorso se unen a un colector que se desvía por imposición de los depósitos pleistocenos del río Neuquén (Fig. 4.5), disponiéndose sub-paralelo a éste e indicando un levantamiento importante post-Pleistoceno (Cristallini et al., 2005).

La información sísmica de subsuelo en esta región, muestra poca complejidad estructural, por lo que esta estructura ha sido explicada por inversión de tectónica de los hemigrábenes precuyanos (Cristallini et al., 2005, Mareto & Pángaro, 2005). Mosquera & Ramos (2006) relacionaron esta estructura a inversión transpresiva vinculada a subducción

oblicua entre el Jurásico Inferior y el Valanginiano (Cretácico Inferior). Mareto & Pángaro (2005) mediante el análisis de la sísmica 2D existente, identificaron los diferentes eventos compresivos que tuvieron lugar en la zona, uno durante el Berrasiano-Valanginiano inferior, asociado con la deformación de la Dorsal de Huincul y uno más reciente asociado al Neógeno, que le habría dado su configuración actual (Zamora Valcarce et al., 2009)

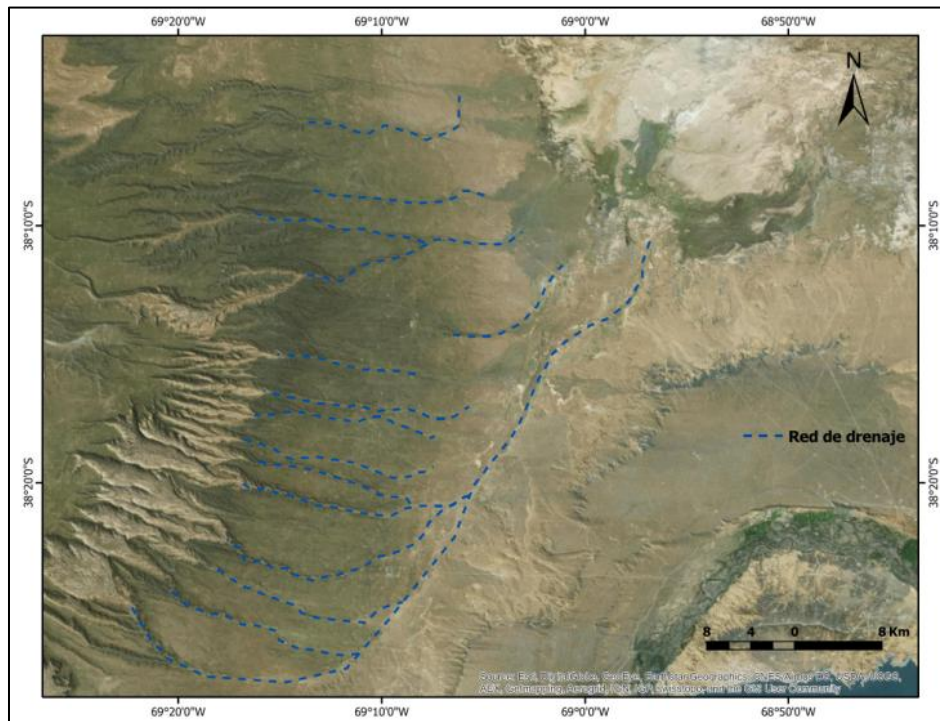


Figura 4.5. Red de drenaje marcada con líneas discontinuas en azul al sur del área del Dorso de los Chihuidos.

#### 4.7 Bajo de Añelo

El Bajo de Añelo corresponde a una estructura sinclinal localizada entre el Dorso de los Chihuidos y el alto de Entre Lomas (Fig. 4.1). Se trata de una estructura miocena con orientación NO que coincide con el flanco oeste del anticlinal de Entre Lomas, y posee un espesor sedimentario que alcanza los 5000 m.

La historia de inversión del Bajo de Añelo comenzó en el Jurásico Inferior durante la depositación del Grupo Precuyo donde los sistemas de fallas fueron invertidos o segmentados por transpresión. Desde el Jurásico al Cretácico Inferior, el proceso de inversión continuó a lo largo de estrechas zonas transpresivas con orientación ONO, cesando durante el Valanginiano. Los espesores de los grupos Cuyo, Lotena y Mendoza

constituyen la evidencia de la actividad tectónica intermitente. Estas unidades muestran un marcado adelgazamiento hacia el este debido a la actividad en el Alto de Entre Lomas y un suave pinch-out hacia el oeste, relacionado con la actividad del Dorso de los Chihuidos.

Los patrones de crecimiento de los estratos con cuñas y truncaciones son claramente visibles en las líneas sísmicas (Mosquera & Ramos, 2005).

El Cretácico Inferior estuvo caracterizado por una etapa de quietud tectónica, lo cual se ve reflejado por la geometría tabular de las unidades superiores del Grupo Mendoza y de los depósitos del Grupo Bajada del Agrio. La base del Grupo Neuquén está delimitada por la discordancia intersenoniana, producida por la marcada erosión al tope del Grupo Bajada del Agrio. Una discordancia angular de bajo relieve, formada debido a una inclinación del sector este del bajo, se extiende hacia el este en el Alto de Entre Lomas, donde la mayoría de los depósitos del Cretácico Inferior han sido removidos. El Cretácico Superior se caracterizó por el cese de la actividad tectónica, lo cual quedó reflejado en la geometría tabular de las unidades que conforman el Grupo Neuquén. La deformación del Mioceno dio lugar a una sutil reactivación de las fallas de rift provocando un basculamiento de la discordancia Intersenoniana (Mosquera & Ramos, 2005).

#### **4.8 Alto de Entre Lomas**

El Alto de Entre Lomas (Fig. 4.1) es un conjunto de anclinales simétricos (Entre Lomas, Charco Bayo, Loma Montosa y La Jarilla) con orientación NO, asociados a estructuras de orientación este-oeste (Medanito, Aguada de los Indios y Puesto Morales Norte).

El sistema de Entre Lomas se extiende 200 km de norte a sur y tiene 100 km aproximados de ancho (Mosquera & Ramos, 2005).

La región norte de esta estructura está cubierta por flujos volcánicos del Auca Mahuida y el límite oeste coincide con el flanco occidental del anticlinal Entre Lomas. Los anticlinales que conforman este sistema son estrechos, elongados y simétricos (5 a 15 km de ancho y 30 a 70 km de largo), de poco relieve (100 m) y están relacionados a fallas que involucran el basamento.

La geometría de las unidades estratigráficas refleja una deformación a fines del Mioceno. Tal como en la estructura del Dorso de los Chihuidos, la deformación contraccional comenzó por una inversión transpresional y segmentación de los depocentros durante la depositación del Grupo Precuyo (Sinemuriano?). El levantamiento del flanco oeste se ve reflejado por las cuñas en las geometrías de las unidades de los grupos Cuyo, Lotena y Mendoza, con una reducción de 2000 m en el espesor de los sedimentos en una distancia de 20 km, debido a un onlap y truncación.

A partir de la interpretación de las relaciones laterales y de las geometrías deformacionales, el Alto de Entre Lomas es definido como un sistema de desplazamiento de rumbo en el cual los hemigrábenes fueron invertidos por transpresión durante el Cretácico Inferior. El Cretácico Superior se caracterizó por una quietud tectónica, durante la cual la deformación estuvo restringida a unas pocas estructuras. Luego, durante el Mioceno, se reactivó el proceso de inversión y resultó en la deformación de la discordancia intersenoniana y del Grupo Neuquén. Durante el Plioceno, muchas estructuras como los sistemas de Entre Lomas y Loma Montosa, experimentaron colapsos extensionales de cientos de metros (Arregui et al., 1996).

#### **4.9 Unidades estratigráficas de interés hidrogeológico**

##### **4.9.1 Grupo Bajada del Agrio (Méndez et al., 1995).**

El Grupo Bajada del Agrio (Barremiano–Cenomaniano medio) está integrado por la Formación Huitrín (miembros Troncoso y La Tosca) y la Formación Rayoso (miembros Salina, Rincón, Quili Malal, Pichi Neuquén y Cañadón de la Zorra) (Fig. 4.6).

##### **4.10 Formación Rayoso (Herrero Ducloux, 1946)**

Herrero Ducloux (1946, p. 267) definió a la Formación Rayoso (Albiano tardío – Cenomaniano medio) como: “...*todo el conjunto de capas que siguen en concordancia sobre el Yeso de Transición y que hacia arriba están limitadas por la discordancia intersenoniana*”. De acuerdo al criterio litoestratigráfico aplicado por el mismo autor (Herrero Ducloux, 1947, p 171) “*La Formación Rayoso se inicia con un grupo de espesor variable constituido por arcillas varicolores, blandas, con intercalaciones de yeso y ocasionalmente bancos de sal, sigue luego una sección sumamente arenosa formada por*

*gruesos bancos de areniscas rojizas o rojo amarillentas, con estratificación entrecruzada, y finalmente encontramos una sección, por lo menos tan espesa como la suma de las dos anteriores en la que predominan las arcillas rojas”.*

| Groeber (1946) |  | Herrero Ducloux (1946) |  | Uliana, Dellapé y Pando (1975) |  | Legarreta & Boll (1982) |  | Leanza (2003)           |  | Zavala et al. (2006), este trabajo. |  |                  |  |
|----------------|--|------------------------|--|--------------------------------|--|-------------------------|--|-------------------------|--|-------------------------------------|--|------------------|--|
| Neuqueniano    |  | Formación del Neuquén  |  | Grupo Neuquén                  |  | Grupo Neuquén           |  | Grupo Neuquén           |  | Grupo Neuquén                       |  |                  |  |
| Diamantino     |  | Formación Rayoso       |  | Fm. Cañadón de la Zorra        |  | sección clástica        |  | Mb. Cañadón de la zorra |  | Secuencia R3                        |  |                  |  |
|                |  |                        |  | Mb. Pichi Neuquén              |  |                         |  | Mb. Pichi Neuquén       |  |                                     |  |                  |  |
|                |  |                        |  | Mb. Quili Malal                |  |                         |  | Mb. Quili Malal         |  |                                     |  |                  |  |
|                |  |                        |  | Mb. Rincón                     |  |                         |  | Mb. Rincón              |  |                                     |  |                  |  |
| Rinconense     |  | "Yeso de transición"   |  | Mb. Salina                     |  | sección evaporítica     |  | Mb. Salina              |  | Secuencia R1                        |  |                  |  |
| Salinense      |  |                        |  | Miembro La Tosca               |  |                         |  | Miembro La Tosca        |  | Miembro La Tosca                    |  |                  |  |
| Tosquense      |  |                        |  | Fm Huitrín                     |  |                         |  | Miembro Troncoso        |  | Miembro Troncoso                    |  | Miembro Troncoso |  |
| Troncosense    |  |                        |  |                                |  |                         |  | sup. inf.               |  | sup. inf.                           |  | sup. inf.        |  |
| Chorreadense   |  | Fm AGRIO               |  | Fm Huitrín                     |  | Fm Huitrín              |  | Fm Huitrín              |  | Fm Huitrín                          |  |                  |  |
| Agriense       |  |                        |  | Formación Agrio                |  | Fm Agrio                |  | Formación Agrio         |  | Formación Agrio                     |  |                  |  |

Figura 4.6. Síntesis de las subdivisiones estratigráficas propuestas para la Fm. Rayoso por diversos autores. Zavala et. al., (2011).

La figura 4.6 muestra un cuadro estratigráfico con las subdivisiones propuestas por diferentes autores para la Formación Rayoso. Según el esquema aplicado por Herrero Ducloux (1946), esta unidad incluye a los miembros La Salina, Rincón, Quili Malal, Pichi Neuquén y Cañadón de la Zorra dentro de dicha formación.

La Formación Rayoso se encuentra limitada en la base mediante un contacto neto con los bancos calcáreos del Mb. La Tosca de la Formación Huitrín y, su vez, es cubierta por la Formación Candeleros mediante la discordancia intersenoniana, donde se observa a menudo el rasgo geométrico de angularidad tanto en afloramiento, como en subsuelo.

Los depósitos de la Formación Rayoso conforman una unidad clástico-evaporítica acumulada en un medio predominantemente continental, con una distribución aproximada de 15.000 km<sup>2</sup> y hasta 1200 m de espesor en el centro oeste de la cuenca (Groeber, 1946, 1953; Herrero Ducloux, 1946; Zollner & Amos, 1973; Uliana et al., 1975a, 1975b; Legarreta, 1985), el cual disminuye de manera notable hacia la zona de plataforma hasta

desaparecer como consecuencia de la acción erosiva de la discordancia ubicada en la base del Grupo Neuquén.

Zavala & Ponce (2011), definen la existencia de tres secuencias estratigráficas (R1, R2 y R3), dentro de las que pueden reconocerse 16 facies sedimentarias. Además, de acuerdo al agrupamiento natural de estas facies reconocen dos intervalos denominados como Cortejo de Contracción (CC) y Cortejo de Expansión (CE) (Fig. 4.7).

### **Miembro Salina (Groeber, 1946)**

Está constituido por arcilitas y en menor grado limolitas y areniscas acompañadas por anhidrita y estromatolitos de extensión regional. Las arcilitas, se disponen en estratos tabulares gruesos a muy gruesos. La coloración es abigarrada y las tonalidades dominantes son rojizas, verdosas, amarillentas, grises, castaño claras y oscuras. Las asociaciones de areniscas y fangolitas presentan tonos rojizos, los cuales se tornan verdes azulados en proximidad a delgados niveles de margas. También existen algunos niveles de pelitas laminares de color gris oscuro. Por otra parte, es frecuente la presencia de niveles con concreciones calcáreas, aplanadas y de coloración castaño oscura. Las acumulaciones de yeso conforman niveles blancos, lenticulares, de poca extensión lateral y escasa potencia, alcanzando excepcionalmente el metro de espesor. Internamente consisten en nódulos ovoides de hasta 5 cm de yeso puro, sacaroide, en general ligados con abundante arcillas gris y yeso pulverulento. La presencia de bancos de halita es típica en este miembro, de allí el nombre “Salinense” propuesto por Groeber. La sal aparece en partes como un mosaico de grandes cristales translúcidos o como cristales de yeso con pseudomorfosis cúbica. (Leanza, 2003).

Los depósitos de esta unidad se acumularon dentro y en la periferia de un cuerpo salino y restringido de tipo perenne, de esta manera corresponden al Cortejo de Contracción de la Secuencia R1 propuesta por Zavala & Ponce (2011).

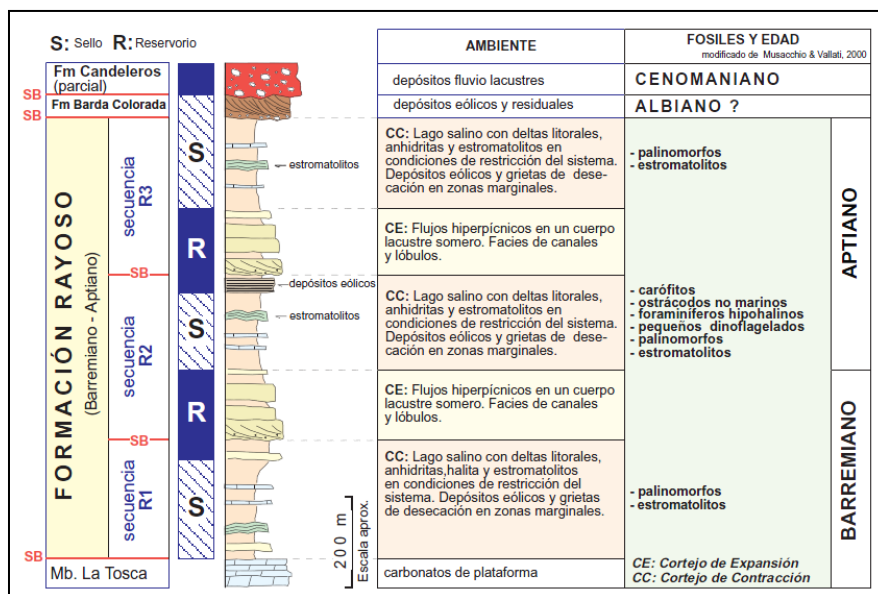


Figura 4.7. Columna estratigráfica generalizada para la Fm. Rayoso. Modificado de Zavala et. al, (2001; 2006). Zavala et. al., (2011).

### Miembro Rincón (Groeber, 1946)

Esta unidad está limitada a la base por el Mb. Salina y es cubierta en contacto neto por el Mb. Quili Malal, en afloramientos se distingue por su coloración rojiza oscura y una fuerte expresión morfológica. Comprende una sucesión alternante de areniscas y fangolitas con niveles intercalados de limolitas calcáreas verdes. Las areniscas son de color rojo ladrillo, castaño rojizo o gris rosado, con granos medianos a finos, subangulosos y de buena permeabilidad. Se dispone en estratos tabulares con base erosiva y la sucesión presenta un patrón de apilamiento estratocreciente y granodecreciente. (Leanza, 2003).

De acuerdo al esquema propuesto por Zavala & Ponce (2001), el ambiente depositacional del Miembro Rincón corresponde a flujos hiperpícnicos en un cuerpo lacustre somero, dentro del cual se incluyen facies de canales y lóbulos.

### Miembro Quili Malal (Uliana et al., 1975b)

El Miembro Quili Malal cubre concordantemente al Miembro Rincón a través de un contacto neto y es cubierto del mismo modo por el Miembro Pichi Neuquén. Se distingue claramente por su característico bandeamiento, conformado por niveles fangolíticos de coloraciones rojizas y verdosas entre los que intercalan al menos 7 niveles de yeso macizo,

los cuales sobresalen en afloramientos debido a su mayor dureza relativa con respecto a las fangolitas. Las acumulaciones de yeso conforman bancos de coloración blanco verdosa, de buena extensión lateral que llegan a superar el metro de potencia.

Ponce et al., (2002) interpretaron que la anhidrita presente sería incorporada en solución a través del nivel freático y concentrada por evaporación dentro del lago, mientras que las fangolitas fueron depositadas por decantación en aguas calmas, infiriendo para estas sedimentitas un paleoambiente lacustre salino. De esta manera, el Miembro Quili Malal correspondería al Cortejo de Contracción de la Secuencia R2.

### **Miembro Pichi Neuquén (Weaver, 1931)**

El Miembro Pichi Neuquén se dispone en forma concordante sobre el Miembro Quili Malal y es cubierto de igual forma por el Miembro Cañadón de la Zorra. Está integrado por areniscas finas a medias bien seleccionadas, cuya coloración dominante es castaño rojizo y se disponen en estratos tabulares muy gruesos con base erosiva, entre los que suelen presentarse intercalaciones de fangolitas rojizas y verdosas.

Esta unidad corresponde a materiales transportados en suspensión turbulenta dentro de un flujo hiperpícnico, acumulados en un lago de tipo salobre (Zavala & Ponce, 2011).

### **Miembro Cañadón de la Zorra (Uliana et al., 1975b)**

El Miembro Cañadón de la Zorra comprende la unidad superior de la Formación Rayoso y se dispone de forma concordante sobre el Miembro Pichi Neuquén. A su vez, es cubierto por la Formación Candeleros (Gr. Neuquén), en cuyo contacto Uliana et al., (1975a y b) y Ramos (1981) describen un biselamiento progresivo de la unidad infrayacente, traducido en una truncación de bajo ángulo. Esta discontinuidad se conoce como Discordancia Miránica Principal ó más antiguamente como Intersenoniana o Intercretácica.

Este Miembro está constituido por areniscas finas a medias bien seleccionadas y fangolitas, de color rojo ladrillo a anaranjado claro, en las que se intercalan frecuentemente niveles yesíferos muy delgados. Los depósitos de areniscas suelen conformar cuerpos constructivos grano y estratocrecientes con espesores de hasta 4 m. Por otra parte, los

estratos con areniscas bien seleccionadas presentan escasa continuidad lateral y los espesores individuales no superan los dos metros.

De acuerdo a Zavala & Ponce (2011), esta asociación de depósitos corresponde a sistemas deltaicos litorales y eólicos marginales desarrollados dentro y en la periferia de un cuerpo salino restringido de tipo perenne.

#### 4.10.1 Grupo Neuquén (Stipanovic et al., 1968)

El Grupo Neuquén (Cenomaniano – Campaniano) comprende una sucesión de depósitos continentales (“capas rojas”) de origen fluvial, con intercalaciones de episodios eólicos y lacustres someros, desarrollados durante gran parte del Cretácico Superior, conformando los afloramientos mesozoicos de mayor distribución areal dentro de la Cuenca Neuquina (Cazau & Uliana, 1973). Este conjunto de depósitos está vinculado al inicio de la etapa de antepaís de la Cuenca Neuquina, como consecuencia de una tectónica compresional sobre el margen andino acaecida a fines del Cretácico Superior (Tunik et al., 2010).

Las acumulaciones que constituyen el Grupo Neuquén se agrupan en tres subgrupos y siete formaciones (Fig. 4.8), que en las zonas de mayor acumulación alcanzan los 1200 m de espesor y están limitadas a la base y el techo por las discordancias Intersenoniana y Huantráiquica.

#### 4.11 Subgrupo Río Limay (Ramos 1981)

Este subgrupo comprende las formaciones Candeleros, Huincul y Cerro Lisandro. Estas acumulaciones de origen fluvial, depositadas durante el Cenomaniano al Turoniano

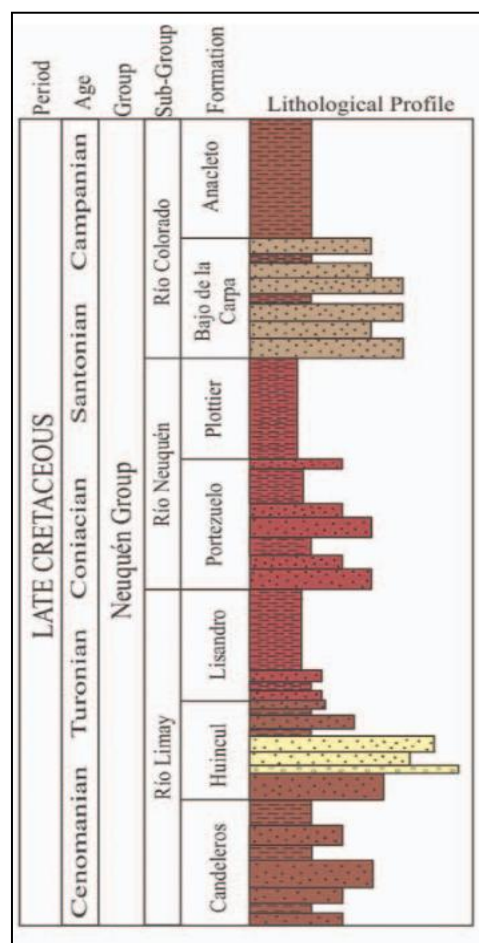


Figura 4.8. Columna estratigráfica del Grupo Neuquén. Rainoldi et al., (2014).

medio, corresponden principalmente a areniscas cuarzolíticas de granulometría variada con alternancia de fangolitas y escasos horizontes conglomerádicos (Garrido, 2011), cuyo espesor máximo alcanza los 350 m.

### **Formación Candeleros (Keidel en Wichmann, 1927)**

La Formación Candeleros, asignada al Cenomaniano temprano (Orchuela y Ploszkiewickz, 1984; Leanza & Hugo, 1997; Tunik et al., 2010), se dispone sobre la Formación Rayoso mediante la discordancia Intersenoniana, marcada por un contacto angular y/o erosivo.

Comprende depósitos de areniscas rojizas de grano fino, areniscas grauváquicas, grauvacas y conglomerados, intercalados con fangolitas rojas, que en afloramientos alcanza los 200 m de espesor.

Un rasgo característico de estas acumulaciones, es la presencia de matriz fangosa, que le imprime una coloración morada a rojo hígado, lo que hace a esta unidad de fácil distinción con respecto a las suprayacentes que conforman este subgrupo.

Los ambientes depositacionales que dieron lugar a las acumulaciones de esta formación son muy variados y dependen de su posición paleogeográfica dentro de la cuenca. Leanza et. al., (2001) y Sánchez et. al., (2002) describen a esta unidad como depositada a partir de sistemas fluviales meandriiformes y entrelazados con desarrollo de paleosuelos y ambientes pantanosos.

### **Formación Huincul (Keidel en Wichmann, 1927)**

La Formación Huincul suprayace de manera concordante a la Formación Candeleros y se le asigna una edad comprendida entre el Cenomaniano tardío y el Turoniano temprano (Legarreta & Gulisano 1989; Garrido 2010).

Esta unidad está conformada por depósitos de areniscas cuarcíticas y cuarzolíticas de granulometría variable con escasa matriz, moderado contenido de cemento carbonático y escasos bancos de conglomerados intraformacionales, que en afloramientos alcanza un

espesor máximo de 250 m. Se caracteriza por un típico color amarillento debido a la presencia de óxido férrico.

Las sedimentitas de esta unidad se asocian a un ambiente fluvial (de mayor energía con respecto al de la Formación Candeleros) con dos arreglos depositacionales. Una sección inferior caracterizada por migración lateral de canales en una planicie de inundación bien desarrollada y una sección superior de cuerpos apilados verticalmente con clastos fangosos a la base y sin depósitos de planicie de inundación (Rainoldi et al., 2012b).

#### **Formación Cerro Lisandro (Herrero Ducloux 1939)**

Esta unidad, depositada durante el Turoniano tardío - Coniaciano temprano (Hugo & Leanza 2001; Leanza et al., 2004) se dispone de manera concordante sobre la Formación Huincul y es sobrepuesta de manera transicional por los depósitos de la Formación Portezuelo (Subgrupo Río Neuquén) (Garrido 2011).

Comprende una sucesión de bancos pelíticos de color rojo con intercalaciones de areniscas de grano fino y limolitas rojas y verdes, depositados en amplias planicies aluviales (Leanza & Hugo 2001). Las variaciones en el suministro de sedimentos y en el espacio de acomodación están vinculadas a los cambios en la tasa de subsidencia, los que resultan en los principales controles de la acumulación del Subgrupo Río Limay (Garrido 2010; Rainoldi et al., 2012b)

#### **4.11.1 Características Petrofísicas de las unidades de estudio**

#### **4.12 Formación Rayoso**

Marteau (2002), en base al análisis de datos petrofísicos y descripción de testigos corona en el área de Puesto Hernández (norte de la provincia del Neuquén) y afloramientos en sector centro oeste de la cuenca de la Formación Rayoso, diferenciaron 3 tipos de rocas.

### **Roca Tipo I**

Formada por areniscas finas (0,14-0,24 mm), texturalmente maduras, muy bien a bien seleccionadas, con clastos subangulosos a subredondeados y con un empaquetamiento abierto. No presentan clastos arcillosos o son muy escasos y pequeños.

Los valores de porosidad son excelentes (24-30 %). La permeabilidad es muy buena y varía entre 169,5 y 614,1 mD (conductividad hidráulica 0,0023 y 0,008 m/día). Todas las muestras son de tamaño arena fina. Las que se acercan al límite inferior de dicho rango tienen valores de permeabilidad más bajos relativamente que las que se encuentran cercanas al límite superior.

### **Roca Tipo II**

Compuesta por areniscas finas (0,2-0,24 mm) y texturalmente submaduras. Poseen moderada selección y clastos angulosos a subangulosos. El empaquetamiento es intermedio. Son comunes los clastos arcillosos que generan pseudomatríz.

Los valores de porosidad son buenos (13-20 %), al igual que los de permeabilidad, los cuales varían entre 221,5 y 98,6 mD (conductividad hidráulica 0,003 y 0,001 m/d).

### **Roca Tipo III**

Está representada por areniscas muy finas (0,07-0,12 mm), texturalmente maduras, muy bien seleccionadas, con clastos angulosos a subangulosos.

Los valores de porosidad son de moderados a buenos (6-15 %), siendo la selección de tamaños porales de buena a muy buena. La permeabilidad es de regular a baja (0,161-0,83 mD) ( $2,2 \cdot 10^{-7}$  y  $1 \cdot 10^{-5}$  m/día), debido a la presencia de dolomita (9-20 %) como cemento.

Estos tres tipos de roca, descritos en el área de Puesto Hernández, actúan como reservorios de hidrocarburos, debido a sus buenas características petrofísicas, presiones de reservorio bajas y viscosidades de petróleo diferentes tanto en dirección vertical como lateral.

#### **4.13 Subgrupo Río Limay**

Los depósitos de la sección basal del Gr. Neuquén constituyen reservorios productores de petróleo en el yacimiento mendocino Llanquanelo. De acuerdo a Manacorda et. al., (2002), en este sector de la cuenca, las acumulaciones del Subgrupo Río Limay tienen porosidades de 12 a 18 % y permeabilidades de 20 a 300 mD ( $2,8 \cdot 10^{-4}$  y 0,004 m/día), en profundidades que alcanzan los 900 mbbp.

En el área de la Dorsal de Huinul, donde se encuentra el Cerro Granito, los depósitos basales de areniscas rojizas del Grupo Neuquén (formaciones Candeleros y Huinul) están blanqueadas. En las areniscas rojas, la porosidad varía entre 1,67 % y 7,35 % con un promedio de 5 %. El cemento de calcita y analcita representa el 20 % de la muestra, la cual sugiere que la porosidad inicial era de 25 % aproximadamente. En las areniscas blanqueadas de la Formación Candeleros, la porosidad es del orden del 5,4 %, mientras que en las areniscas blanqueadas de la Formación Huinul, la porosidad varía entre 7,37 % y 23,3 %, la analcita está presente en cantidades menores al 2 %, pero la porosidad puede ser del 0 % en muestras donde la concentración de calcita llega al 24 % (Rainoldi et. al., 2015).

## 5 RESULTADOS

### 5.1 Litoestratigrafía en las regiones morfoestructurales

#### 5.1.1 Dorso de los Chihuidos

En la región del Dorso de los Chihuidos existen afloramientos de la Fm. Rayoso y del Gr. Neuquén, el espesor de este último está restringido solo a unos pocos metros, alcanzando como máximo 100 m (Fig. 5.1). En este caso se trata principalmente de areniscas medias a gruesas, de color castaño rojizo oscuras, pobremente seleccionadas con matriz arcillosa. En algunos casos, hacia el norte de la región del Dorso de los Chihuidos, es común encontrar niveles conglomerádicos castaño rojizos de hasta 5 m, con clastos subangulares, mal seleccionados y matriz arcillosa (Fig. 5.2).

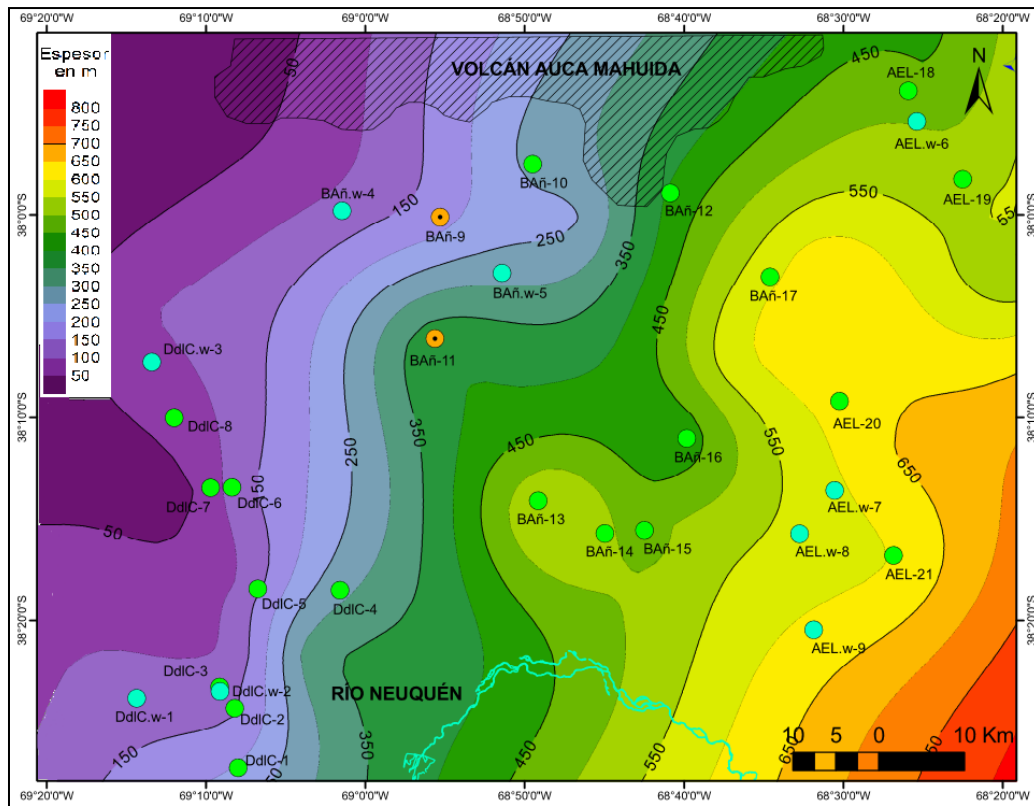


Figura 5.1. Mapa isopáquico en metros del Gr. Neuquén.

Los depósitos de la Formación Rayoso alcanzan los 450 m de espesor (Fig. 5.3), con afloramientos de hasta 350 m de potencia. En los primeros 200 m, desde la base, predominan las areniscas finas a medias de color marrón claro, con clastos subredondeados

y pobre selección. Las arenas se encuentran intercaladas con niveles de arcilitas, limolitas y arcilitas limosas, que en el total del intervalo no superan el 25 % y cuyo color varía entre marrón rojizo oscuro y gris verdoso oscuro, con fractura subplanar e irregular.

En el espesor restante hacia el tope se describen areniscas medias a gruesas, cuyo color varía entre marrón claro y rojo grisáceo, con clastos subredondeados y subangulosos, pobremente seleccionados y matriz arcillosa. Entre los bancos de areniscas intercalan niveles de limolitas y arcilitas limosas, que no superan el 40 % del total del intervalo. Las limolitas son de color marrón, presentan fractura irregular y son comunes hacia la sección media de la Formación Rayoso, mientras que las arcilitas limosas son más frecuentes hacia el tope de dicha formación y se caracterizan por ser de color marrón rojizo oscuro con fractura irregular (Fig. 5.2).

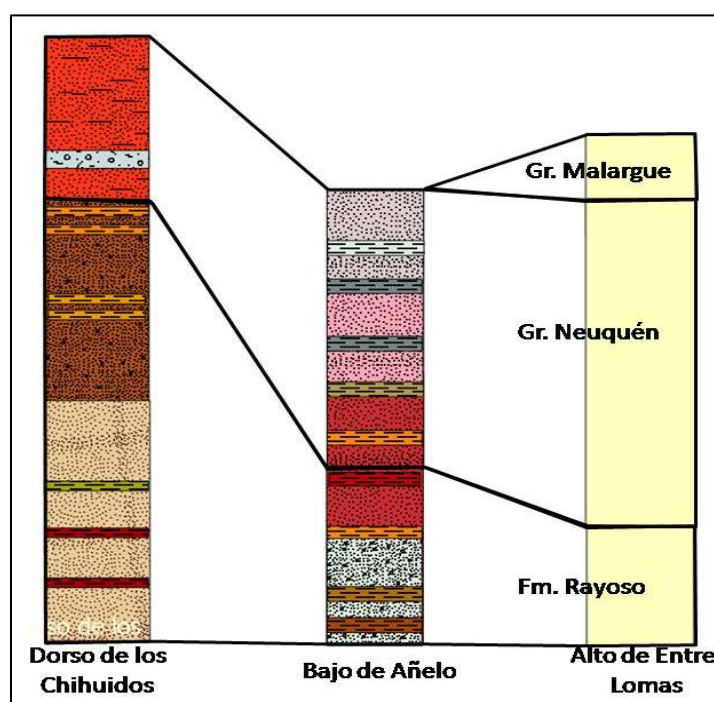


Figura 5.2. Columnas litológicas esquemáticas para cada región morfoestructural.

### 5.1.2 Bajo de Añelo

En el área del Bajo de Añelo, aflora la sección inferior del Gr. Neuquén y los depósitos que lo conforman alcanzan en promedio los 500 m de espesor (Fig. 5.1). En la base son comunes las areniscas medias a gruesas de color castaño rojizo con clastos angulares a subangulares, mal seleccionadas, que hacia el tope se tornan rosadas a

blanquecinas con gradación de los clastos de medios a gruesos y muy gruesos, subredondeados a redondeados, cuya selección es de regular a buena. Los niveles litológicos más finos corresponden, desde la base hacia al tope a arcilitas, limoarcilitas y limolitas que gradan a limolitas arenosas con colores que varían de castaños rojizos a castaños, gris claro y gris blanquecino (Fig. 5.2).

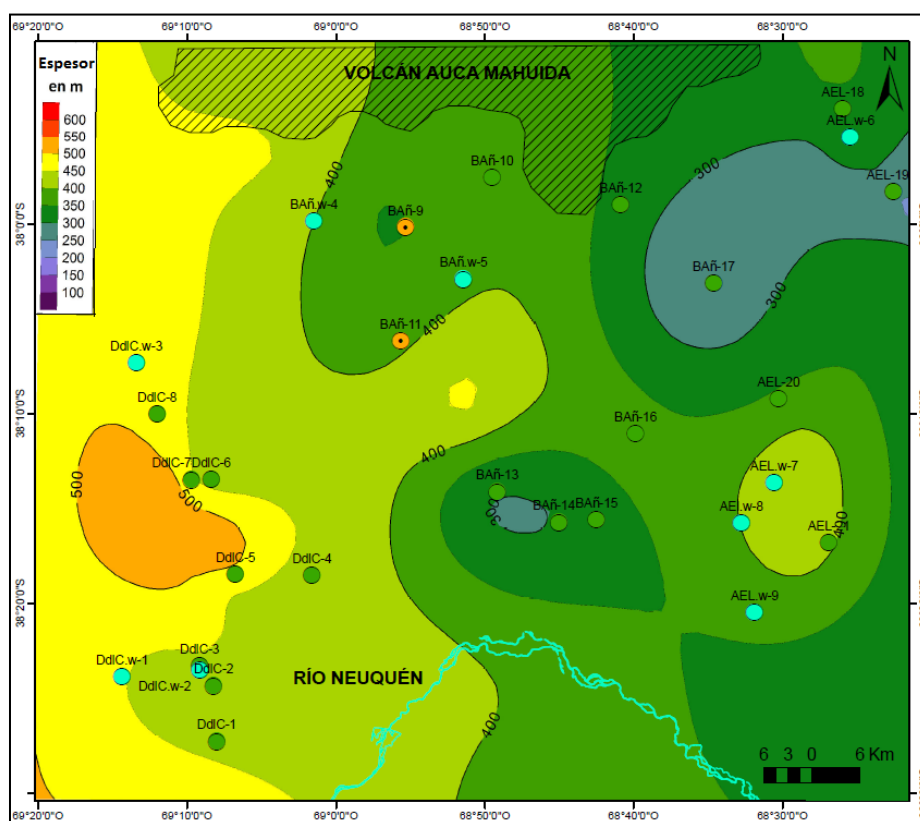


Figura 5.3. Mapa isopáquico en metros de la Fm. Rayoso.

La Formación Rayoso no se observa en afloramientos y posee un espesor promedio de 350 m (Fig. 5.3). Está formada por areniscas que van desde grises blanquecinas en la base a castaños rojizos al tope. De acuerdo a la descripción de los recortes de perforación de los pozos ubicados en este sector, existe una gradación de areniscas con tamaño de grano de medio a grueso en la base a areniscas finas en el tope. En general, los primeros 200 m de esta unidad (desde la base) están caracterizados por una mayor cantidad de intercalaciones entre areniscas, limoarcilitas y arcilitas, las cuales varían entre color castaño claro, rojizo y gris verdoso, y en algunos casos suelen estar acompañadas por trazas de yeso blanquecino (Fig. 5.2).

### **5.1.3 Alto de Entre Lomas**

En el área del Alto de Entre Lomas se registran depósitos del Cretácico Superior – Paleogeno Temprano, correspondientes al Grupo Malargüe (Legarreta y Uliana, 1999). De acuerdo con algunos esquemas de pozo para esta región posee un espesor de hasta 200 m, luego el Grupo Neuquén que alcanza los 700 m y por último la Formación Rayoso que supera los 300 m de espesor (Fig. 5.2).

## **5.2 Pases formacionales determinados con registros eléctricos**

### **5.2.1 Base de la Formación Rayoso**

Se observa un espesor de 50 m, en promedio, donde predominan valores bajos de rayos gamma. De acuerdo a la descripción de los recortes de perforación, los valores “limpios” responden a la presencia de areniscas, mientras que los registros “sucios” corresponden a los niveles de limolitas y arcilitas (Fig. 5.4).

Si bien existe una intercalación entre areniscas, limolitas y arcilitas en todo el intervalo de la Formación Rayoso, hacia la base los niveles de limo-arcilíticos no poseen el espesor necesario para ser detectados por la herramienta de perfilaje y el tramo se caracteriza por lecturas de rayos gamma ‘limpios’.

La presencia de los paquetes arenosos hacia la base de la Formación Rayoso, provocan una deflexión de la curva de los registros de inducción, registrando valores mayores con respecto a niveles adyacentes con mayor contenido de limolitas y arcilitas (Fig. 5.4).

### **5.2.2 Tope de la Formación Rayoso y base del Grupo Neuquén**

En la región del Dorso de los Chihuidos, el límite entre las unidades de estudio está representado por un cambio brusco en la curva de rayos gamma. La base del Gr. Neuquén está representada por valores bajos de rayos gamma y el tope de la Fm. Rayoso está caracterizado por niveles de rayos gamma más elevados (Fig. 5.4), observándose un cambio brusco en las lecturas.

El cambio “brusco” en el registro de los valores de rayos gamma, en este caso, coincide con dos situaciones relacionadas entre sí, la primera de ellas corresponde a la

ubicación de la discordancia intersenoniana entre ambas unidades y la segunda está relacionada al cambio litológico que se produce en ese punto.

Aunque ambas unidades estratigráficas están integradas por intercalaciones de areniscas y limoarcilitas, en la base del Gr. Neuquén, para esta región de la cuenca, predominan las areniscas, lo que coincide con la deflexión de la curva de Rayos Gamma hacia la izquierda con respecto a las lecturas del tope de la Fm. Rayoso, donde hay mayor presencia de niveles arcilíticos.

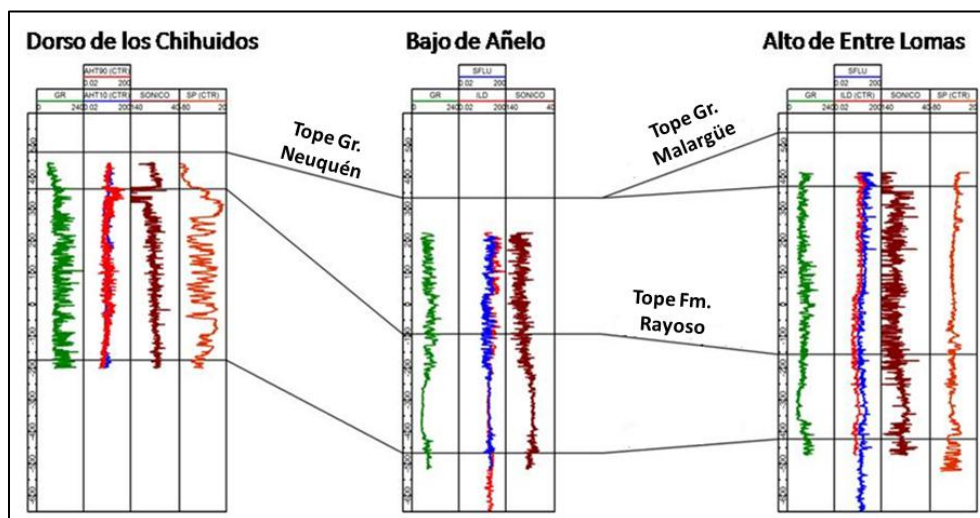


Figura 5.4. Comportamiento tipo de un set de registros eléctricos para las tres regiones morfoestructurales. Profundidad medida en metros sobre el nivel del mar.

En el área del Bajo de Añelo, el pase formacional entre los depósitos del Gr. Neuquén y la Fm. Rayoso se ubicó luego de un intervalo de 200 m de espesor promedio en el que se observan valores bajos de rayos gamma y que de acuerdo a las descripciones litológicas coinciden con los niveles con predominio de areniscas situados en la base del Gr. Neuquén. Este comportamiento de la curva, se utilizó para correlacionar el pase formacional en los pozos de la región del Alto de Entre Lomas (Fig. 5.4).

### 5.2.3 Tope del Grupo Neuquén

El tope del Gr. Neuquén, en la región del Alto de Entre Lomas, está representado por un cambio en el registro de rayos gamma con respecto a la unidad suprayacente, en la que se registra un incremento en el valor de las lecturas del perfil. En caso de las regiones

del Dorso de los Chihuidos y el Bajo de Añelo, el Gr. Neuquén se encuentra en superficie y es por esto que no se identificó el tope de esta unidad utilizando perfiles eléctricos de pozo.

#### 5.2.4 Mapas estructurales al tope de la Formación Rayoso y del Grupo Neuquén

Una vez ubicados los pases formacionales se confeccionaron mapas estructurales al tope de la Fm. Rayoso y del Gr. Neuquén (Fig. 5.5 y 5.6).

En la figura 5.5 se observa como los depósitos del Gr. Neuquén que están en superficie en el sector oeste se profundizan hacia el este alcanzando una profundidad de 200 mbbp.

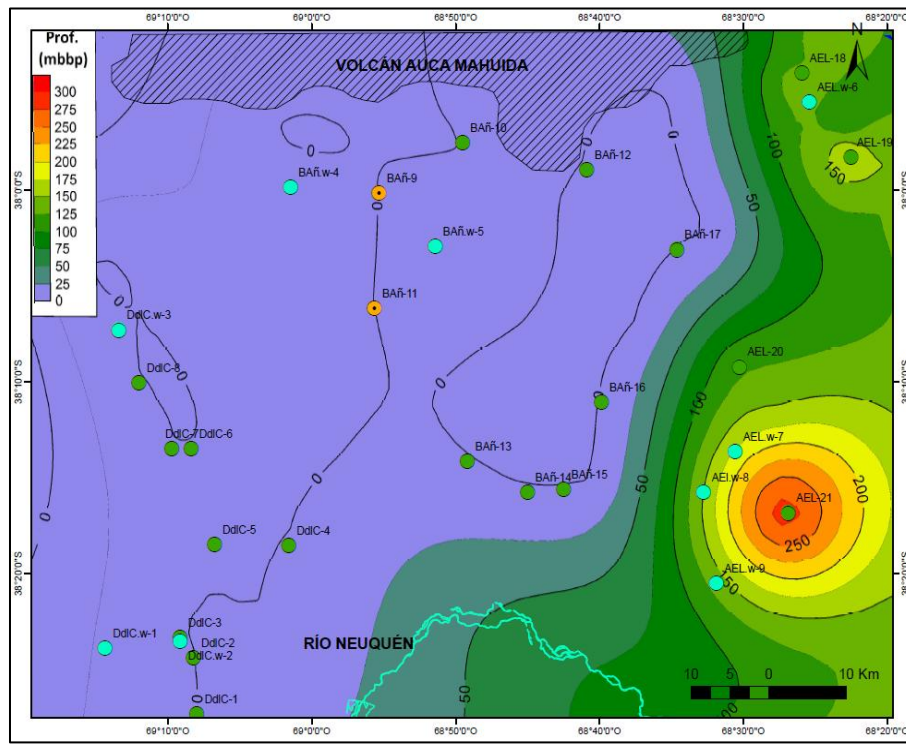


Figura 5.5. Mapa estructural al tope del Gr. Neuquén medido en mbbp.

El tope de la Fm. Rayoso se encuentra por debajo de los 50 a 150 mbbp en el sector oeste del área de estudio (Fig. 5.6) y al igual que el Grupo Neuquén, sus depósitos se ubican a mayor profundidad en dirección hacia el este donde el tope de esta unidad está por debajo de los 650 mbbp.

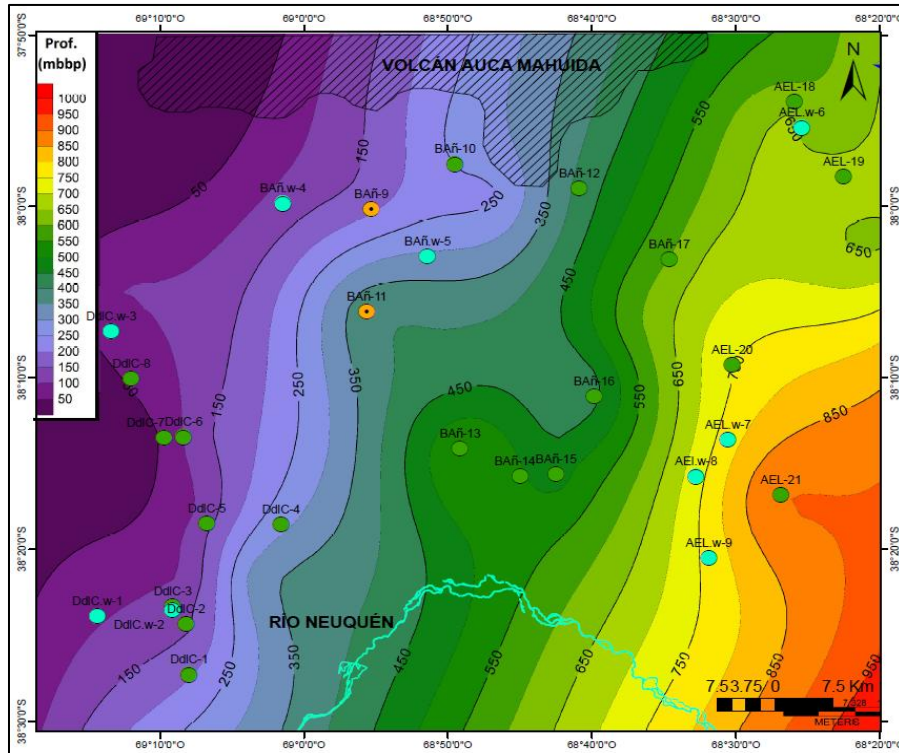


Figura 5.6. Mapa estructural al tope de la Fm. Rayoso medido en mbbp.

### 5.3 Propiedades acuíferas de las rocas

#### 5.3.1 Criterios límites para las propiedades

Para delimitar los potenciales niveles acuíferos a partir de las curvas generadas de volumen de arcillas, porosidad y salinidad, se determinaron valores límite para cada una de ellas utilizando diversos criterios que se exponen a continuación.

Según la clasificación geológica e hidrogeológica propuesta por Custodio & Llamas (1983), expresada en la tabla A 1.2 del Anexo 1, las gravas y arenas o areniscas gruesas son buenos acuíferos, mientras que las arenas finas o con mezcla de limos son acuíferos pobres.

Considerando lo propuesto por Custodio & Llamas (op. cit.), a menor cantidad de material fino, mejor condición de la roca para actuar como acuífero. Pero si se tiene en cuenta que las unidades de estudio conforman intercalaciones entre areniscas, limolitas y arcilitas, y que a su vez las arenas contienen matriz arcillosa, se estableció un límite de arcillas del 25 %. Si bien este valor podría ser demasiado alto para un buen acuífero, se

tuvo en cuenta que el método de estimación del contenido arcilloso suele sobreestimar el resultado con respecto a los valores reales.

Al igual que el método para el cálculo del volumen de arcillas, la ecuación de Wyllie modificada, para la estimación de la porosidad, suele arrojar valores mayores a los reales. Más allá de esto, se considera que una roca poco consolidada, tal como las unidades de estudio, que estratigráficamente conforman los niveles superiores de la columna, poseen porosidades van del 25 al 50 %. Por esto para determinar los valores límites de la curva de porosidad (PHI), se consideró un límite inferior del 17 % para incluir aquellos niveles de areniscas con matriz arcillosa.

El Decreto N° 2656/99 de la Provincia del Neuquén determina un límite de 3000 ppm de sales totales y/o 4000  $\mu\text{ho}/\text{cm}$  de conductividad para considerar que un acuífero posee agua dulce, es por esto que se consideró un valor límite de 3000 ppm para delimitar los potenciales niveles acuíferos.

Por último, y en relación con la variación en la resolución de las diferentes herramientas de perfilaje (Fig. A1.1, Anexo 1), y su capacidad de registrar espesores mínimos, se estableció un límite mínimo de 1 m para determinar las unidades que reúnen las condiciones anteriores.

Con estos criterios se establecieron los valores límites de los parámetros para determinar los potenciales acuíferos (Tabla 1).

Tabla 1. Valores límite para delimitar niveles potencialmente acuíferos.

| <b>Límites para delimitar potenciales niveles acuíferos</b> |                   |
|---|-------------------|
| Curva   | Valor             |
| Volumen de Arcillas   | < 25 %            |
| Porosidad   | 17 % < PHI < 50 % |
| Salinidad   | < 3000 ppm        |
| Espesor de la capa  | > 1 m             |

### **5.3.2 Curvas tipo de propiedades hidrogeológicas**

Para cada perforación con registros eléctricos se estimó el contenido de arcillas, la porosidad y la salinidad de acuerdo a la metodología y criterios límite indicados.

### **5.4 Volumen de Arcillas**

Se generaron curvas de Volumen de Arcillas (Vsh) a partir del registro de rayos gamma tal como describe la ecuación 6. Las curvas obtenidas, se representan con escala de 1 a 100 % en color verde en la pista 4 del set de perfiles de la figura 5.7.

### **5.5 Porosidad**

La porosidad se calculó a partir de la ecuación 13. Para el tiempo de tránsito del fluido ( $\Delta t_f$ ) se usó el valor recomendado (189  $\mu\text{s}/\text{ft}$ ), en el caso del tiempo de tránsito en la matriz se escogió 54  $\mu\text{s}/\text{ft}$ , debido a que este es el valor recomendado por los especialistas para este tipo de cálculos, al igual que para el factor de corrección empírico ( $C_p$ ), para el que se utilizó 1,5. Así, se generó una curva de porosidad (PHI) en porcentaje de 0 a 100 en color azul, representada en la pista 5 del set de perfiles (Fig. 5.7).

### **5.6 Salinidad**

Se obtuvieron curvas con estimación de la salinidad (ppm eq. de NaCl) a partir de la ecuación 9. Para calcular  $R_w$  (ecuación 8) se consideró la porosidad obtenida por la ecuación de Wyllie modificada (ecuación 13) y valores de 2 y 1 para los coeficientes  $m$  y  $a$  respectivamente, de acuerdo a la recomendación realizada por especialistas en el tema.

En la figura 5.7 se muestra la curva generada de salinidad (SALINIDAD) en color violeta en la pista 6, utilizando una escala que va de 0 a 10000 ppm eq. de Cloruro de Sodio.

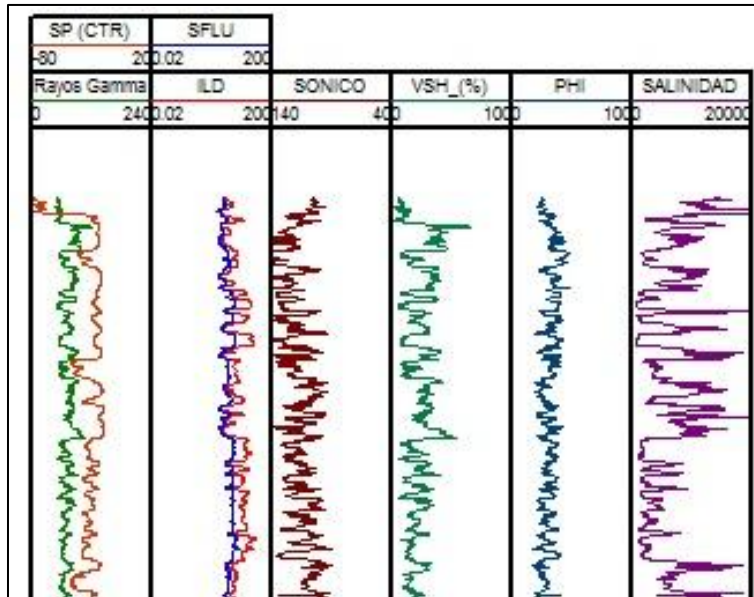


Figura 5.7. Set de perfiles eléctricos y curvas generadas de aptitudes hidrogeológicas.

### 5.6.1 Volumen de arcillas, porosidad y salinidad en las Perforaciones

Se realizó una transecta regional A-A' (Figs. 5.8 y 5.9) y se calcularon los valores promedio de volumen de arcillas, porosidad y salinidad (ppm eq. NaCl) de los potenciales niveles acuíferos para el Gr. Neuquén y la Fm. Rayoso por pozo (Tabla 2).

La estimación de las aptitudes hidrogeológicas se realizó para todos los pozos seleccionados y los valores promedio de dichas aptitudes para las unidades estratigráficas en estudio se muestran en la tabla A3.1. A partir de esto se realizó una caracterización en cuanto a volumen de arcillas, porosidad y salinidad, del Gr. Neuquén y de la Fm. Rayoso en las diferentes regiones morfoestructurales. En la tabla 3 se muestran dichos valores.

Tabla 2. Valores promedio de volumen de arcillas, porosidad y salinidad por pozo para el Gr. Neuquén y la Fm. Rayoso.

| Pozos  | Grupo Neuquén |           |                 | Fm. Rayoso |           |                 |
|--------|---------------|-----------|-----------------|------------|-----------|-----------------|
|        | Vsh Prom.     | PHI Prom. | Salinidad Prom. | Vsh Prom.  | PHI Prom. | Salinidad Prom. |
| DdIC-1 | 10,14         | 20,69     | 1339            | 16,98      | 22,03     | 1503            |
| DdIC-6 | 3,4           | 20,8      | 2213            | 8,45       | 22,54     | 2574            |
| DdIC-8 | 13,08         | 20,8      | 2200            | 20,12      | 22,54     | 987             |
| BAñ-11 | 13,93         | 27,11     | 1758            | 19,82      | 22,83     | 2291            |
| BAñ-16 | 16,11         | 39,28     | 1147            | 12,47      | 27        | 2065            |
| AEL-20 | 16,36         | 26,57     | 2609            | 10,54      | 21,56     | > 3000          |
| AEL-19 | 18,5          | 30,94     | 1832            | 13,21      | 23,54     | > 3000          |

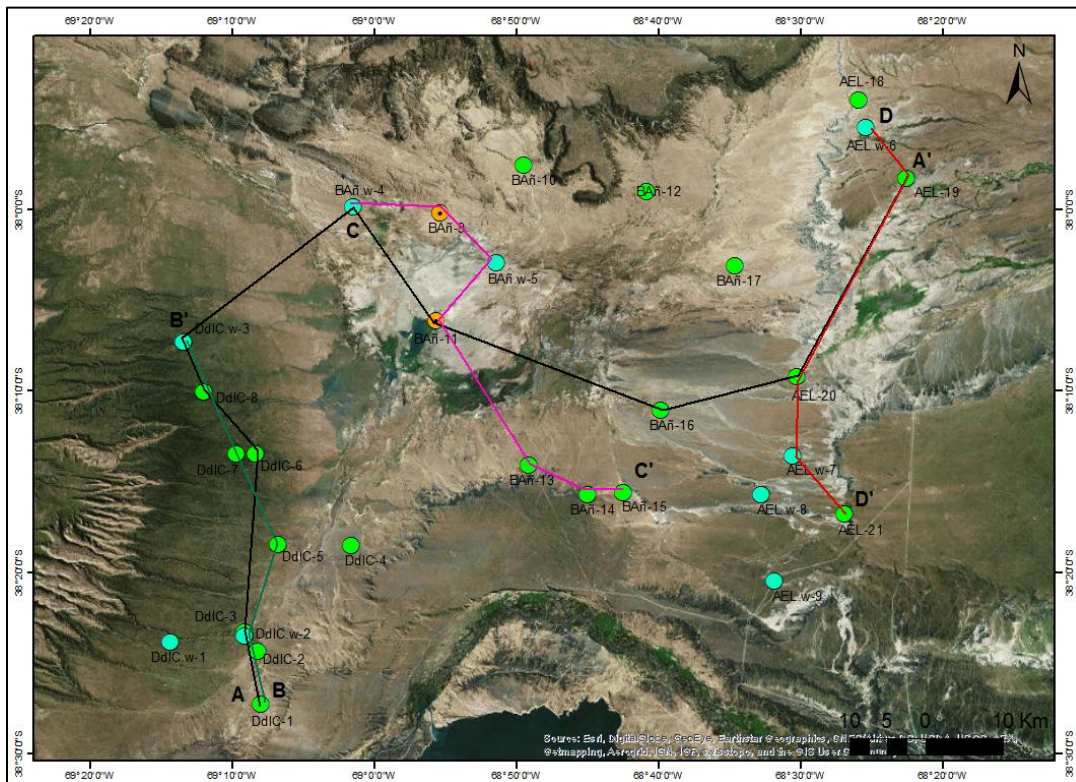


Figura 5.8. Ubicación de la transectas A-A' (color negro), B-B' (color verde), C-C' (color violeta) y D-D' (color rojo).

Tabla 3. Valores promedio de volumen de arcillas, porosidad y salinidad para el Gr. Neuquén y la Fm. Rayoso en el área de estudio.

|                                 | <b>Dorso de los Chihuidos</b> |                   | <b>Bajo de Añelo</b> |                   | <b>Alto de Entre Lomas</b> |                   |
|---------------------------------|-------------------------------|-------------------|----------------------|-------------------|----------------------------|-------------------|
|                                 | <b>Gr. Neuquén</b>            | <b>Fm. Rayoso</b> | <b>Gr. Neuquén</b>   | <b>Fm. Rayoso</b> | <b>Gr. Neuquén</b>         | <b>Fm. Rayoso</b> |
| <b>Volumen de arcilla Prom.</b> | 12,48                         | 15,65             | 16,92                | 16,8              | 16,54                      | 11,77             |
| <b>Porosidad Prom.</b>          | 20,83                         | 21,05             | 32,05                | 23,45             | 29,53                      | 22,79             |
| <b>Salinidad Prom.</b>          | 1875                          | 1981              | 1885                 | 2236              | 2278                       | 2165              |

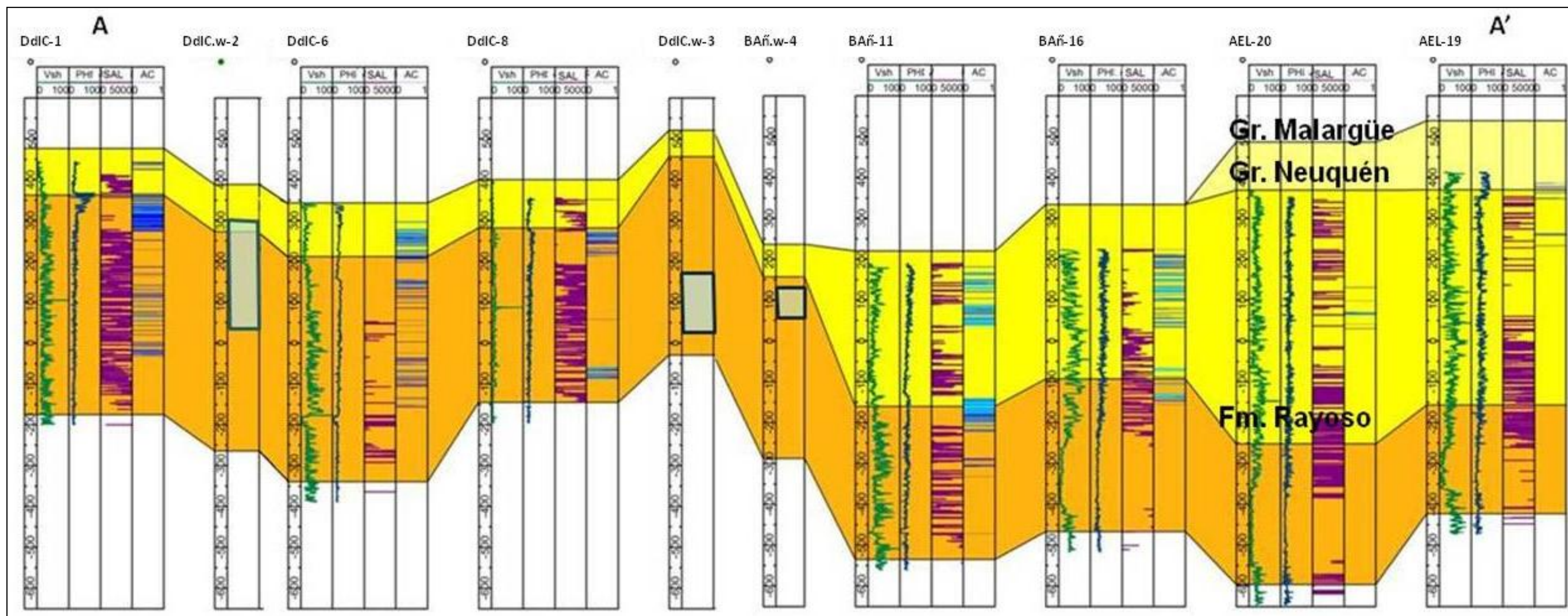


Figura 5.9. Transecta A-A'. Profundidad medida en msnm. Curvas generadas de volumen de arcillas (Vsh, pista 1), porosidad (PHI, pista 2), salinidad (SAL, pista 3), y potenciales niveles acuíferos (AC, pista 4) y rangos de profundidades de los acuíferos en pozos de agua (pista 1).

## 5.7 Zonificación de las unidades acuíferas presentes

Para constatar si existe alguna relación entre los niveles acuíferos detectados por los pozos de agua se construyó una transecta por cada región morfoestructural (transectas B-B', C-C' y D-D', fig. 5.8)

En la transecta A-A' de la figura 5.9 se observa la disposición de las unidades estratigráficas de interés en el área de estudio pero resulta dificultoso correlacionar regionalmente los potenciales acuíferos, mientras que evaluando las transectas por unidad morfoestructural (Figs. 5.10, 5.11 y 5.12) es visible como los potenciales niveles acuíferos interpretados coinciden en profundidad, con buena aproximación, con los acuíferos alumbrados en los pozos de agua.

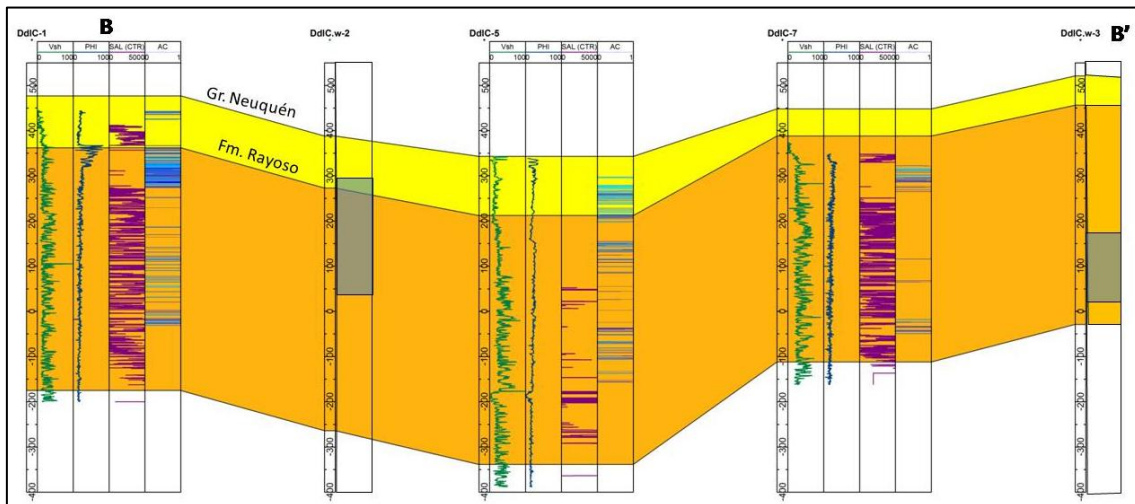


Figura 5.10. Transecta B-B'. Profundidad medida en msnm. Curvas generadas de volumen de arcillas (Vsh, pista 1), porosidad (PHI, pista 2), salinidad (SAL, pista 3), y potenciales niveles acuíferos (AC, pista 4) y rangos de profundidades de los acuíferos en pozos de agua (pista 1).

En los pozos con curvas generadas se observa mayor cantidad de posibles niveles acuíferos con respecto a los pozos de agua. Esto se debe a que en los pozos de agua se establece un rango de profundidades que contiene los diferentes niveles, mientras que a partir de las curvas de aptitudes hidrogeológicas se pueden diferenciar con más detalle porque uno de los valores límites escogidos para las curvas establece espesores de 1 m como mínimo.

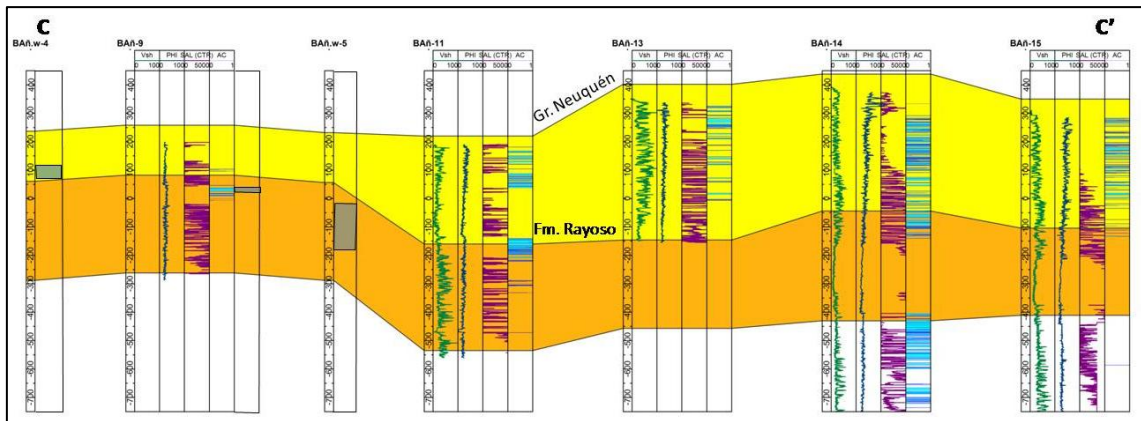


Figura 5.11. Transecta C-C'. Profundidad medida en msnm. Curvas generadas de volumen de arcillas (Vsh, pista 1), porosidad (PHI, pista 2), salinidad (SAL, pista 3), y potenciales niveles acuíferos (AC, pista 4) y rangos de profundidades de los acuíferos en pozos de agua (pista 1 y pista 5 en pozo BAÑ-9).

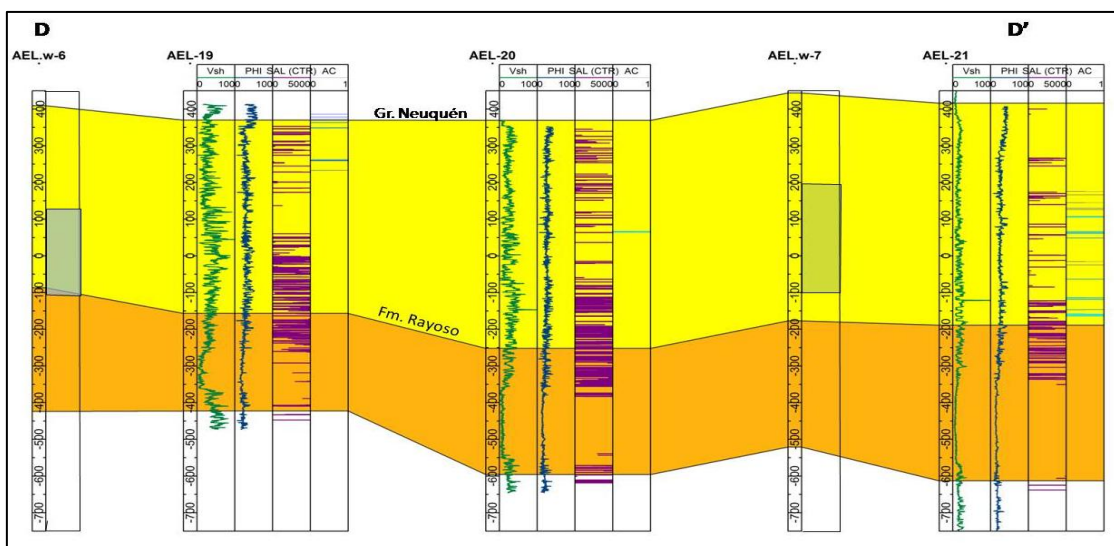


Figura 5.12. Transecta D-D'. Profundidad medida en msnm. Curvas generadas de volumen de arcillas (Vsh, pista 1), porosidad (PHI, pista 2), salinidad (SAL, pista 3), y potenciales niveles acuíferos (AC, pista 4) y rangos de profundidades de los acuíferos en pozos de agua (pista 1).

En la tabla 4 los rangos de profundidades de acuíferos detectados en el Dorso de los Chihuidos ubicados entre 200 y 500 mbbp coinciden con los niveles previstos en la figura 5.10. Los potenciales niveles acuíferos en el Bajo de Añelo según los registros eléctricos (Fig. 5.11) están entre los 70 y 800 mbbp y se encuentran dentro del rango de profundidades indicados en la tabla 4. En el Alto de Entre Lomas los posibles niveles acuíferos registrados se ubican entre los 352 y 560 mbbp (Fig. 5.12) y coinciden con los detectados por perforaciones de agua (Tabla 4). La ausencia de registros eléctricos en la sección mas somera de las perforaciones impide identificar niveles acuíferos cercanos a la superficie en el Bajo de Añelo y el Alto de Entre Lomas

## **5.8 Dinámica de los acuíferos estimada con la información de pozos existentes**

La caracterización hidrogeológica se realizó con información de pozos existentes que han sido perforados para exploración y explotación de hidrocarburos y para explotación de agua. Por lo tanto la calidad de la información no es homogénea. En muchos pozos no se indican los niveles acuíferos explotados, por lo que se asume que se localizan donde se han colocado los filtros. En algunos casos los filtros tienen hasta 300 m de longitud por lo que no se puede determinar con precisión en cual formación acuífera se colocó y la profundidad del nivel piezométrico medido representa un estado de carga promedio en esos 300 m de espesor.

Por otro lado las mediciones de niveles piezométricos son de diferentes épocas, pero dada la escasez de información se han utilizado para estimar los flujos de agua, bajo el supuesto de que el sistema está en equilibrio y que los niveles se han mantenido aproximadamente constantes.

Por último la densidad de pozos existentes es baja, por esto la descripción que se realiza en este apartado debe ser considerada preliminar y sujeta a revisión cuando se disponga de más y mejor información.

En la tabla 4 se indican los pozos utilizados y su respectivo nivel estático en msnm (calculados restando la profundidad medida a la cota del terreno). Las coordenadas (en sistema PosGAR 94 faja 2) de cada uno de ellos se detallan en la tabla A2.1 del anexo 2.

### **5.8.1 Información disponible de los niveles piezométricos medidos en pozos**

Los datos obtenidos de pozos acuíferos se muestran en la tabla 4, y de acuerdo a los rangos productivos para cada uno se determinó cual es la unidad hidrogeológica productora en cada caso (Tabla 5).

Tabla 4. Niveles acuíferos y caudales de bombeo identificados en pozos acuíferos y de agua. (\*)SS: Semisurgente. S: Surgente, s/d: sin datos.

| Pozo     | Cota Topográfica (msnm) | Tipo de acuífero(*) | Prof. Estática (mbbp) | Nivel Estático (msnm) | Fecha | Niveles acuíferos Profundidades (mbbp) | Caudal (m3/día) |
|----------|-------------------------|---------------------|-----------------------|-----------------------|-------|--|-----------------|
| DdlC.w-1 | 516                     | SS                  | 148                   | 368                   | 2014  | 200 - 400                              | 1316            |
| DdlC.w-2 | 395                     | SS                  | 51,33                 | 343,67                | 2015  | 88 - 354                               | 1207            |
| DdlC.w-3 | 521,02                  | SS                  | 161,1                 | 359,92                | 1994  | 350 - 500                              | 180             |
| BAñ.w-4  | 241                     | S                   | +76                   | 321                   | 2012  | 120 - 170                              | 1140            |
| BAñ.w-5  | 232,7                   | S                   | +70                   | 302                   | 2013  | 360 - 420                              | 2500            |
| BAñ-11   | 219,7                   | S                   | +70                   | 289,7                 | 1994  | 0-200                                  | s/d             |
| AEL.w-6  | 523,9                   | SS                  | 226                   | 297,9                 | 1989  | 349 - 606                              | 735             |
| AEL.w-7  | 520                     | SS                  | 167                   | 353                   | 2008  | 312 - 619                              | 250             |
| AEL.w-8  | 503,51                  | SS                  | 157                   | 346                   | 2013  | 186 - 246                              | s/d             |
| AEL.w-9  | 487,82                  | SS                  | 133                   | 354                   | 2013  | 184 - 256                              | s/d             |

Tabla 5. Unidades productoras de agua por pozo.

| Pozo     | Unidad Hidrogeológica Productora |
|----------|----------------------------------|
| DdlC.w-1 | Fm. Rayoso                       |
| DdlC.w-2 | Gr. Neuquén y Formación Rayoso   |
| DdlC.w-3 | Fm. Rayoso                       |
| BAñ.w-4  | Gr. Neuquén                      |
| BAñ.w-5  | Gr. Neuquén y Fm. Rayoso         |
| BAñ-11   | Gr. Neuquén                      |
| AEL.w-6  | Gr. Neuquén                      |
| AEL.w-7  | Gr. Neuquén                      |
| AEL.w-8  | Gr. Neuquén                      |
| AEL.w-9  | Gr. Neuquén                      |

### 5.8.2 Unidad acuífera Fm. Rayoso

A partir de los niveles estáticos calculados (Tabla 4) se obtuvo con el método de interpolación kriging utilizando los pozos que tienen los filtros en la Fm Rayoso la representación de equipotenciales que se indica en la figura 5.13.

Los niveles estáticos (aunque de distintas fechas) van desde 365 msnm en el Dorso de los Chihuidos a 305 en el pozo ubicado en el Bajo de Añelo. La dirección general del flujo es de oeste a este, con gradientes hidráulicos regionales muy bajos (0,15 a 0,2%).

En estas condiciones se puede inferir que el área de recarga estaría ubicada en los afloramientos de la Fm Rayoso en el flanco este del Dorso de los Chihuidos y en la

margen izquierda del río Neuquén. El Bajo de Añelo presenta niveles piezométricos positivos que determinan surgencias en los pozos que han atravesado esta formación. Esta carga positiva genera condiciones favorables para la recarga de los acuíferos del Gr. Neuquén suprayacentes.

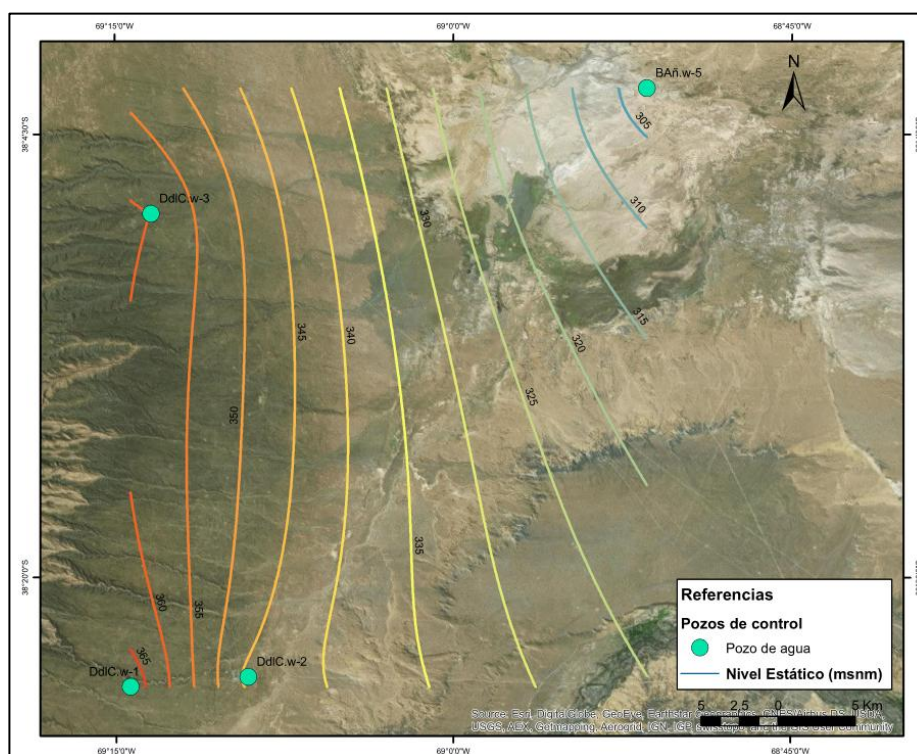


Figura 5.13. Mapa potenciométrico de la Fm. Rayoso

### 5.8.3 Unidad acuífera Gr. Neuquén

Los niveles estáticos calculados para los niveles observados de los acuíferos del Gr. Neuquén (Tabla 4) permiten estimar las equipotenciales de la figura 5.14.

Los mayores niveles piezométricos se localizan en la zona sureste con 350 msnm y noroeste con 325 msnm, mientras que los menores se localizan en el Bajo de Añelo con 295 msnm y la base del volcán Auca Mahuida. Los flujos se dirigen hacia el centro de la cuenca con gradientes promedio entre 0,17 y 0,19 %.

Se puede inferir que la recarga se produciría en los afloramientos del Gr. Neuquén en el Dorso de los Chihuidos y posiblemente en la zona sur a través de la vinculación con el río Neuquén. De acuerdo a estos datos no es evidente la recarga de los niveles acuíferos del Gr. Neuquén inferior en la zona del volcán Auca Mahuida.

Como se indicó, en la zona central existen condiciones favorables para la recarga desde la unidad acuífera Fm. Rayoso subyacente, debido a la menor carga hidráulica del Gr. Neuquén. Pero dada las limitaciones de los datos indicados (fechas de medición e valores promedio de los niveles piezométricos) las diferencias de 10 a 15 m de carga hidráulica entre la Fm. Rayoso y Gr. Neuquén, pueden no ser significativas y deben ser recalculadas con nuevos datos.

También existe una posible recarga desde el borde de cuenca este y noreste de la cuenca, lo cual estaría apoyado por el tipo de agua sulfatada encontrada en los pozos de la zona este.

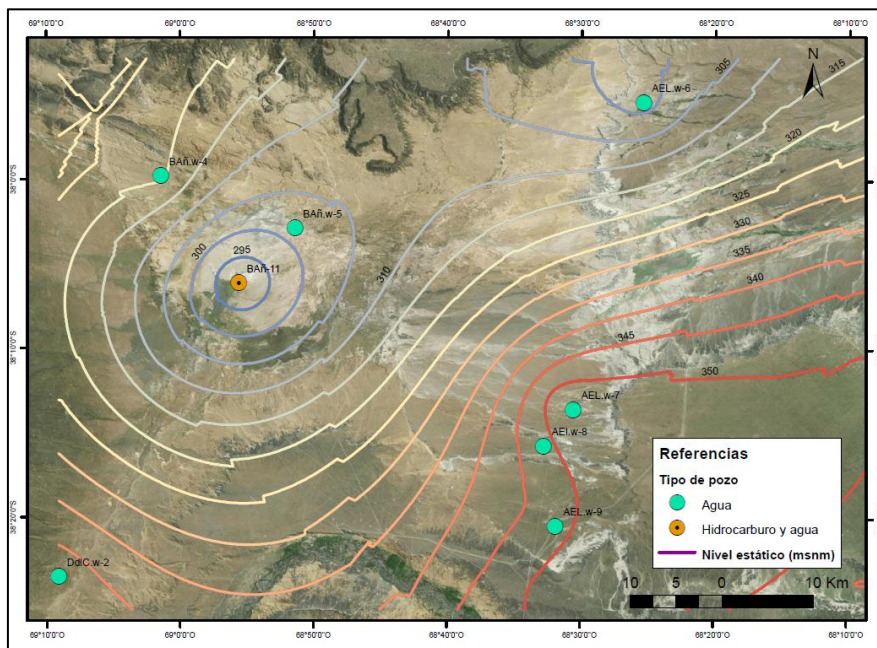


Figura 5.14. Mapa potenciométrico del Gr. Neuquén

## 5.9 Hidrogeoquímica de las unidades acuíferas en las regiones morfoestructurales

Con el fin de evaluar la calidad química del agua se representaron parámetros hidroquímicos en diagramas de Piper-Hill-Langelier y Stiff de muestras de agua tomadas en los siguientes pozos:

- DdC.w-1, DdC.w-2, DdC.w-3, BAñ.w-4, BAñ.w-5, BAñ.w-9, BAñ.w-11, AEL.w-6 y AEL.w-7.

La ubicación de los pozos evaluados se observa en la figura 3.18 y la tabla con los valores correspondientes a los análisis químicos de cada pozo se encuentran en el Anexo 3 (Tabla A3.2).

### 5.9.1 Diagrama de Piper-Hill- Langelier

En la figura 5.15 se representa a que facie hidroquímica corresponden las muestras de agua de acuerdo al diagrama de Piper-Hill-Langelier.

En la región del Dorso las muestras de los pozos DdlC.w-1 y 3 corresponden a la Fm. Rayoso y la del DdlC.w-2 representa al Gr. Neuquén y la Fm. Rayoso. De esta manera las muestras de agua del Dorso de los Chihuidos son cloruradas a bicarbonatadas sódicas, en el Alto de Entre Lomas son sulfatadas sódicas y las del Bajo de Añelo coinciden con facies cloruradas a sulfatadas sódicas a excepción de Bañ-11 que es clorurada a bicarbonatada sódica.

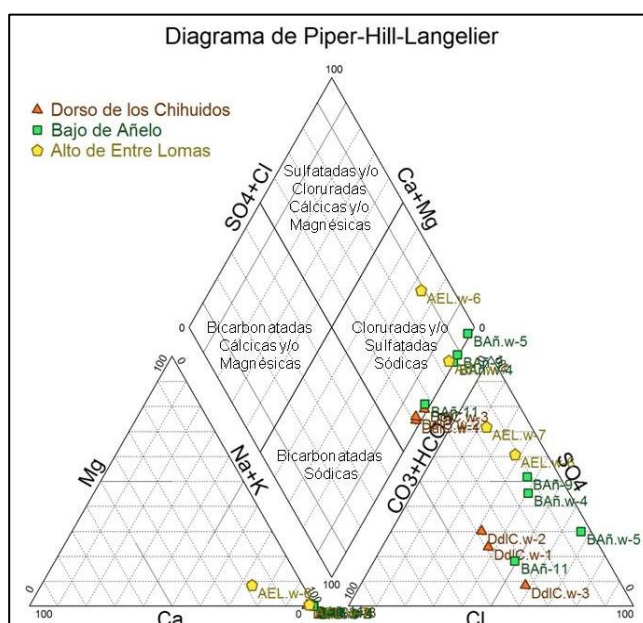


Figura 5.15. Representación de análisis hidroquímicos de nueve pozos en el diagrama de Piper-Hill-Langelier.

### 5.9.2 Diagrama de Stiff

Para comprender mejor la evolución del agua en el área de estudio, se graficaron las concentraciones de aniones y cationes de las muestras de los nueve pozos mencionados en el diagrama de Stiff (Figs. 5.16 y 5.17).

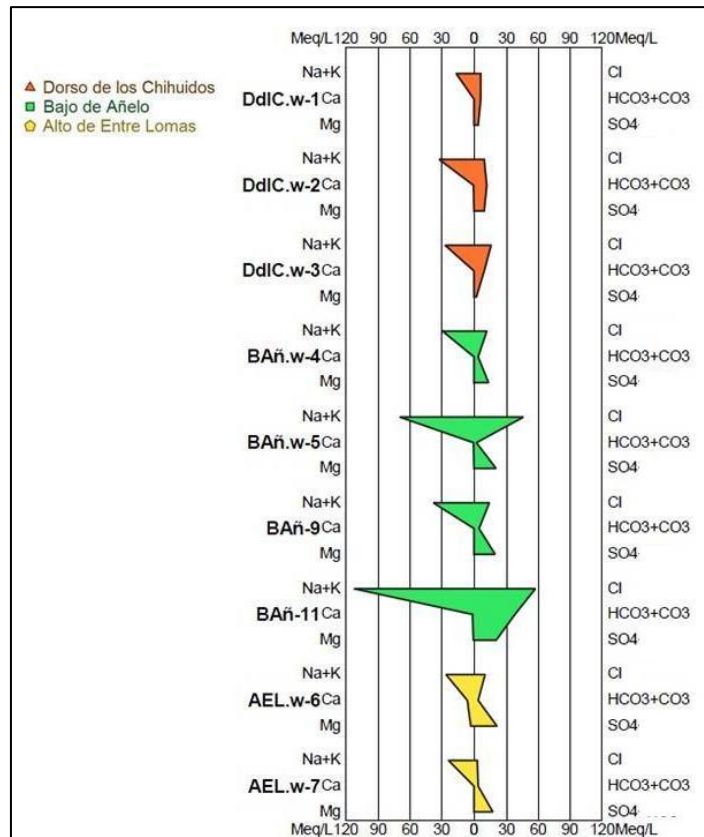


Figura 5.16. Representación en el diagrama de Stiff de las muestras de agua.

De acuerdo al diagrama de Stiff, en la región del Dorso de los Chihuidos las muestras de aguas son bicarbonatadas sódicas, salvo una que es clorurada sódica y que corresponde al intervalo inferior de la Fm. Rayoso. En el Bajo de Añelo las muestras de agua son representativas de intervalos acuíferos que comprenden al Gr. Neuquén y a la Fm. Rayoso por separado y en conjunto. Se trata de aguas cloruradas sódicas, cuyo contenido máximo de cloruros es de casi 60 Meq/L y se registró en muestras de la Fm. Rayoso en el pozo BAñ-11. Por otra parte, las muestras correspondientes a la zona del Alto de Entre Lomas presentan un patrón diferente ya que las aguas son predominantemente sulfatas sódicas.

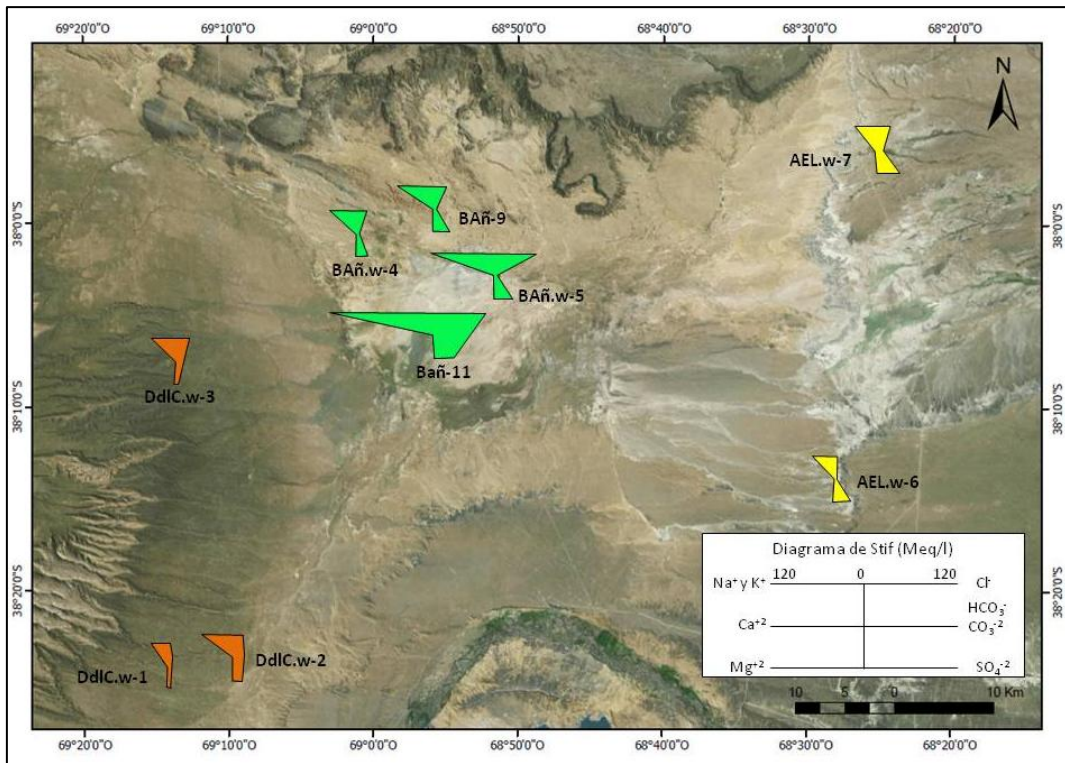


Figura 5.17. Representación geográfica de los resultados obtenidos a partir del diagrama de Stiff en el área de estudio.

## 6 DISCUSIÓN

Debido a que el agua en regiones áridas está limitada a los pocos cursos de agua existentes y principalmente al recurso subterráneo, resulta indispensable la evaluación geológica e hidrogeológica de las diferentes unidades estratigráficas del subsuelo.

Para este Trabajo Final de Licenciatura se propusieron diferentes métodos para evaluar las condiciones geológicas e hidrogeológicas de la Fm. Rayoso y del Gr. Neuquén en subsuelo en el sector centro norte de la provincia del Neuquén.

De acuerdo a los mapas estructurales e isopáquicos las unidades de estudio presentan variación de oeste a este. La Formación Rayoso se encuentra a menor profundidad en la región del Dorso de los Chihuidos (50 mbbp) y presenta el mayor espesor que es del orden de los 400 m. El Gr. Neuquén aumenta de potencia de oeste a este, con máximo un de 600 m en el extremo más cercano al límite con la provincia de Río Negro. Tanto en la región del Dorso de los Chihuidos como en el Bajo de Añelo los espesores son parciales debido a que se encuentra aflorando y afectada por los diferentes procesos erosivos.

De los registros eléctricos disponibles, el de rayos gamma resultó el de mejor ajuste para ubicar topes y bases; sobre todo en el área del Dorso de los Chihuidos donde se observa un cambio brusco en el registro entre la Formación Rayoso y el Grupo Neuquén.

Las aptitudes hidrogeológicas de las unidades de estudio están directamente relacionadas con las características litológicas y varían de acuerdo a la región morfoestructural en la que se encuentren. Por esto no se puede afirmar que exista una determinada unidad acuífera asociada a la Formación Rayoso o al Grupo Neuquén.

La estimación de aptitudes hidrogeológicas a partir de registros eléctricos de pozo permitió delimitar unidades potencialmente acuíferas con buenos resultados. Estas unidades se correlacionaron con buena aproximación con los niveles descritos en pozos de agua cercanos.

Si bien existen diferencias entre los parámetros medidos en afloramientos y en subsuelo, los valores obtenidos de porosidad para las unidades de estudio a partir de los registros eléctricos se encuentran dentro del rango de los registrados por Manacorda et.

al, (2002) y Rainoldi et. al, (2015) en otros sectores de la cuenca. Lo mismo sucede considerando la porosidad medida para la Fm. Rayoso en el área de Puesto Hernández según Marteau (2002).

En el área del Dorso de los Chihuidos las principales unidades acuíferas se ubican en la Formación Rayoso entre los 200 y 500 mbbp. Si bien esta formación presenta buena continuidad hacia el este, en el Bajo de Añelo y el Alto de Entre Lomas, el Grupo Neuquén contiene mayor cantidad de intervalos potencialmente acuíferos detectados entre los 50 y 600 mbbp.

En cuanto a las predicciones de los métodos de registros eléctricos empleados, se observa que en el sector del Dorso de Los Chihuidos la salinidad de la Fm. Rayoso determinada por perfiles es de 1981 ppm (eq. NaCl) y por laboratorio en muestras de agua es de 956 ppm (eq. NaCl). En el Bajo de Añelo la salinidad para Gr. Neuquén varía entre 773 ppm (eq. NaCl) según los datos de laboratorio y de 1885 ppm (eq. NaCl) según los perfiles eléctricos. No se contó con análisis de laboratorio de sales totales para la región del Alto de Entre Lomas pero de acuerdo a los perfiles de pozo la salinidad promedio del Gr. Neuquén es 2278 ppm (eq. NaCl).

En el área de estudio se diferencian tres facies hidroquímicas de acuerdo a las regiones morfoestructurales. En la región del Dorso de los Chihuidos predominan las aguas bicarbonatadas sódicas, en el Bajo de Añelo las cloruradas sódicas y en el Alto de Entre Lomas las facies sulfatadas sódicas.

El análisis del mapa potenciométrico para unidades acuíferas ubicadas en la Fm. Rayoso permite inferir que el área de recarga estaría en los afloramientos ubicados en el flanco este del Dorso de los Chihuidos y en la margen izquierdo del río Neuquén. El Bajo de Añelo presenta niveles piezométricos positivos que determinan surgencias en los pozos que han atravesado esta formación. Esta carga positiva genera condiciones favorables para la recarga de los acuíferos del Gr. Neuquén.

En cuanto a los potenciales niveles acuíferos dentro del Gr. Neuquén, la recarga se produciría en los afloramientos en el Dorso de los Chihuidos y posiblemente en la zona sur a través de la vinculación con el río Neuquén. De acuerdo a estos datos no es evidente la recarga de los niveles acuíferos del Gr. Neuquén inferior en la zona del volcán Auca Mahuida.

Como se indicó, en la zona central existen condiciones favorables para la recarga desde la unidad acuífera de la Fm. Rayoso, debido a la menor carga hidráulica del Gr. Neuquén. Pero dada las limitaciones de los datos indicados (fechas de medición y valores promedio de los niveles piezométricos) las diferencias de 10 a 15 m de carga hidráulica entre la Fm. Rayoso y Gr. Neuquén, pueden no ser significativas y deben ser recalculadas con nuevos datos.

También existe una posible recarga desde el borde este y noreste de la cuenca, lo cual estaría apoyado por el tipo de agua sulfatada encontrada en los pozos de la zona este.

## 7 CONCLUSIONES

El análisis en conjunto de las características litológicas en subsuelo y afloramiento, aptitudes hidrogeológicas y los resultados obtenidos a partir de la interpretación de los análisis químicos de diferentes muestras de agua permite realizar inferencias acerca de la dinámica hidrogeológica en el área de estudio:

- a) La amplia variación litológica de las unidades de estudio en el sector centro este de la Provincia del Neuquén, determina la existencia de diferentes niveles ubicados entre los 0 y 600 mbbp con aptitudes hidrogeológicas óptimas para la acumulación de agua pero con poca continuidad lateral.
- b) Los potenciales niveles acuíferos no se restringen a una unidad estratigráfica en particular y dependen de sus características litológicas y en que unidad morfoestructural se encuentren.
- c) Los principales potenciales niveles acuíferos del Grupo Neuquén se encuentran en las regiones del Bajo de Añelo y el Alto de Entre Lomas.
- d) En el Dorso de los Chihuidos las potenciales unidades acuíferas de mayor interés se ubican dentro de la Formación Rayoso.
- e) La existencia de afloramientos de la Formación Rayoso y el Grupo Neuquén en el área del Dorso de los Chihuidos favorece la recarga de agua de estas unidades en subsuelo.
- f) El análisis de los mapas potenciométricos y la distribución de las facies hidroquímicas sugiere una zona de recarga hacia el oeste en el Dorso de los Chihuidos y de acumulación en el Bajo de Añelo.

Si bien los métodos utilizados para realizar el presente Trabajo Final de Licenciatura tienen una buena respuesta para evaluar dinámica hidrogeológica del área de estudio, la escasez de información disponible no permite tener un mejor ajuste del estudio realizado. Es por esto que sería de gran utilidad realizar estudios específicos para hidrología aplicando la metodología propuesta en el presente TFL.

En base a los resultados obtenidos en el sector centro este de la Provincia del Neuquén existen niveles acuíferos con reservas de agua dulce. Por esto resulta importante que se diagramen campañas cuya finalidad sea ajustar de manera más

apropiada las características de estos acuíferos y así poder determinar con mayor exactitud la cantidad y calidad de este recurso.

Es indispensable continuar con la evaluación de los parámetros de estos niveles acuíferos, debido a que constituyen la mayor reserva de agua en este sector de la Provincia y la explotación de estos sin una correcta comprensión de la dinámica hidrogeológica del área, afectaría la calidad de estos acuíferos.

### **7.1 Futuras líneas de investigación**

La metodología implementada debería ser aplicada a otras zonas de la cuenca neuquina a efecto de realizar la caracterización hidrogeológica.

Por otro lado nueva información de pozos y perfiles eléctricos en el área estudiada permitirán obtener una caracterización más precisa de los límites de las subunidades acuíferas.

Lecturas piezométricas periódicas en los pozos relevados permitirán explicar la dinámica estacional del movimiento del agua en los acuíferos.

## BIBLIOGRAFIA

- Archie, G.E.** 1942. The Electrical Resistivity Logs as an Aid in Determining some Reservoirs Characteristics. *Trans. AIME* 146: 54 – 62.
- Arregui, C., Benotti, S. & Carbone, O.** 1996. Sistemas petroleros asociados en el yacimiento Entre Lomas, Provincia del Neuquén. 13° Congreso Geológico Argentino y 2° Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Actas 1: 287-306. Buenos Aires.
- Astini, R.A.** 1996. Las fases diastróficas del Palaeozoico medio en la Precordillera del oeste argentino. 13° Congreso Geológico Argentino y 2° Congreso de Exploración de Hidrocarburos, Actas 5: 509–526. Buenos Aires.
- Barrio, C.A.** 1990. Late Cretaceous – Early Tertiary sedimentation in a semi-arid foreland basin (Neuquén Basin, Western Argentina). *Sedimentary Geology* 66: 255 – 275.
- Bear, J.** 1972. *Dynamics of Porous Media*. Dover publications, Inc. N.Y., U.S.A.
- Brassington, R.** 1995. *Field Hydrogeology*. John Wley & Sons Ltd., Chichester, UK. 175 pp.
- Cazau, L.B. & Uliana, M.A.** 1973. El Cretácico superior continental de la Cuenca Neuquina. V° Congreso Geológico Argentino, Actas 3: 131-163.
- Chebotarev, I.** 1955. Metamorphism of natural waters in the crust of weathering (1); *Geochimica et Cosmochimica Acta* 8: 22-48.
- Chiachiarelli, F. & Viqueira, M.** 2015. Caracterización y mapeo Grupo Neuquén. Propuesta Perfilajes en Sección Guía. Yacimiento Loma Campana. YPF S.A., Neuquén.
- 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 18° Congreso Geológico Argentino: 833-848, Neuquén.
- Comisión Nacional del Agua.** 2007. Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento: prospección geoelectrica y registros geofísicos de pozo. México.
- Corbella, H., Novas, F.E., Apesteguía, S., & Leanza, H.A.** 2004. First fission track-age for the dinosaur-bearing Neuquén Group (Upper Cretaceous) Neuquén Basin, Argentina. *Revista del Museo Argentino de Ciencias Naturales, Nueva Serie*, 6 (2), 227-232. Buenos Aires.

- Cristallini, E.O., Martínez, J.M., Sanchez, E., Periale Gómez, S. & Loncarich, A.** 2005. Evaluación estructural del bloque Bandurria (Provincia del Neuquén, Argentina). YPF. 73pp. Inédito.
- Custodio, E. & Llamas, M.** 1976. Hidrología Subterránea. Tomo I. Primera Edición. Editorial Omega. Barcelona, España. ISBN 84-282-0447-0
- Fiori, S.M. & Zalba, S.M.** (Eds.). 2000. Plan de Manejo Reserva Provincial Auca Mahuida (Neuquén). Volumen I – Diagnóstico Regional. Secretaría de Estado del COPADE y Consejo Federal de Inversiones. 205 pp.
- Franzese, J.R. & Spalletti, L.A.** 2001. Late Triassic, early Jurassic continental extension in southwestern Gondwana: tectonic segmentation and pre-break-up rifting. *Journal of South American Earth Science* 14: 257 – 270.
- Franzese, J., Spalletti, L., Gómez Pérez, I. & Macdonald, D.** 2003. Tectonic and paleoenvironmental evolution of Mesozoic sedimentary basins along the Andes foothills of Argentina (32° - 54° S). *Journal of South American Earth Sciences* 16: 81 – 90.
- Franzese, J., Veiga, G.D., Schwarz, E. & Gómez Pérez, I.** 2006. Tectono-stratigraphic evolution of a Mesozoic rift border system: the Chachil depocentre, southern Neuquén Basin, Argentina. *Journal of the Geological Society, London*, in press.
- Garrido, A.C.** 2010. Estratigrafía del Grupo Neuquén, Cretácico Superior de la Cuenca Neuquina (República Argentina): Nueva propuesta de ordenamiento litoestratigráfico. *Revista del Museo Argentino de Ciencias Naturales, Nueva Serie*, 12 (2).
- 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.
- GEO COMAHUE. Servicios Geológicos y Ambientales.** 2009. Prospección geoelectrica de aguas subterráneas. Aguada San Roque, departamento Añelo. Provincia del Neuquén.
- Groeber, P.** 1946. Observaciones geológicas a lo largo del meridiano 70° 1. Hoja Chos Malal. *Revista de la Sociedad Geológica Argentina*, 1 (3) : 177-208. Buenos Aires.
- Groeber, P.** 1953. Andico. En: Groeber, P.: Mesozoico. Geografía de la República Argentina. *Sociedad Argentina de Estudios Geográficos (GAEA)* 2 (1) : 349-536. Buenos Aires.

- Herrero Ducloux, A.** 1939. Estratigrafía tectónica de los Estratos con Dinosaurios del Neuquén. En: II° Reunión de Geólogos y Geofísicos de YPF. Boletín de Informaciones Petroleras 16(180): 16-17. Buenos Aires.
- Herrero Ducloux, A.** 1946. Contribución al conocimiento geológico del Neuquén extrandino. Boletín de Informaciones Petroleras, 23 (226) : 1- 39. Buenos Aires.
- Herrero Ducloux, A.** 1947. Los depósitos terrestres del Cretácico medio y superior del Neuquén y sur de Mendoza. Boletín de Informaciones Petroleras 24 (271): 171-178. Buenos Aires.
- Hubbert, M.K.** 1940. The theory of groundwater motion, J. Geol., 48(8): 785-944.
- Hugo, C.A. & Leanza, H.A.** 2001. Hoja Geológica 3069- IV General Roca (escala 1:250.000). Provincias de Río Negro y Neuquén. Instituto de Geología y Recursos Minerales. SEGEMAR. Boletín 308: 1-65. Buenos Aires.
- Keys, W.S.** 1990. Borehole Geophysics Applied to Ground-Water Investigations. U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations TWRI 2-E2, 150 p.
- Leanza, H.A.** 2003. Las sedimentitas huitrinianas 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.
- Leanza, H.A. & Hugo, C.A.** 1997. Hoja Geológica 3969- III - Picún Leufú, provincias del Neuquén y Río Negro. Instituto de Geología y Recursos Naturales. SEGEMAR. Boletín 218: 1-135. Buenos Aires.
- Leanza, H.A., Hugo, C.A. & Repol, D.** 2001. Hoja geológica 3969-I, Zapala (escala 1: 250.000), provincia del Neuquén. Programa Nacional de Cartas Geológicas de la República Argentina a escala 1: 250.000. Instituto de Geología y Recursos Minerales. SEGEMAR. Boletín 275: 1-128. versión digital
- Leanza, H., Apesteguía, S., Novas, F.E. & De la Fuente, M.S.** 2004. Cretaceous terrestrial beds from the Neuquén Basin (Argentina) and their tetrapod assemblages. Cretaceous Research 25: 61-87.
- Legarreta, L.** 1985. Análisis estratigráfico de la Formación Huitrín (Cretácico inferior), provincia de Mendoza. Tesis Doctoral, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires. 197pp. Inédito. Buenos Aires.

**Legarreta, L. & Gulisano, C.A.** 1989. Análisis estratigráfico secuencial de la Cuenca Neuquina (Triásico superior - Terciario inferior). En: G. Chebli & L. Spalletti (Eds.). Cuencas Sedimentarias Argentinas. X° Congreso Geológico Argentino. Serie Correlación Geológica 6: 221-243. Buenos Aires.

**Legarreta, L. & Uliana, M.A.** 1991. Jurassic-Cretaceous marine oscillations and geometry of back arc basin fill, Central Argentine Andes. En: Macdonald, D.I.M. (Ed.) Sedimentation, Tectonics and Eustasy – Sea-level Changes at Active Margins. International Association of Sedimentologists, Special Publications, 12, 429 – 450.

**Legarreta, L. & Uliana, M.** 1999. El Jurásico y Cretácico de la Cordillera Principal y la Cuenca Neuquina. 1. Facies Sedimentarias. En: Caminos, R. (Ed.) Geología Argentina. Instituto de Geología y Recursos Minerales, Anales, 29, 399 – 416.

**Lillo, J.** 2007. Técnicas Hidrogeoquímicas, 140pp., Tesis (en opción del título de Máster Oficial en Hidrología y Gestión de Recursos Hídricos), Universidad Rey Juan Carlos, Madrid, España.

**Macdonald, D., Gomez-Perez, I., Franzese, J., Spalletti, L., Lawver, L., Gahagan, L., Dalziel, I., Thomas, C., Trewin, N., Hole, M., & Paton, D.** 2003. Mesozoic break-up of SW Gondwana: implications for regional hydrocarbon potential of the southern South Atlantic. *Marine and Petroleum Geology* 20, 287–308.

**Manacorda, L., Reinante, S. M. E., Cazau, L. & Penna, E.** 2002, Los reservorios del Grupo Neuquén, En: M. Schiuma, G. Hinterwimmer, and G. Vergani (Eds.), Rocas Reservorios de las Cuencas Productivas de la Argentina: 5° Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Mar del Plata, p. 529–558.

**Maceda, R. & Figueroa, D.** 1995. Inversion of the Mesozoic Neuquén rift in the Malargüe fold and thrust belt, Mendoza, Argentina. En Tankard, A.J., Suarez Soruco, R. & Welsink, H.J. (Eds.) *Petroleum Basins of South America*. AAPG Memoirs, 62, 369 – 382.

**Mancini & Uliana.** 1973. Suministro de agua para recuperación secundaria en el sector oriental de la Cuenca Neuquina. II° Simposio de Recuperación Secundaria de Petróleo y Gas, Bariloche, noviembre, 1973.

**Mareto, H. & Pangaro, F.** 2005. Edad de formación de algunas de las grandes estructuras del engolfamiento de la Cuenca Neuquina: Actividad tectónica durante la depositación de la Fm. Quintuco. 6° Congreso de exploración y Desarrollo de Hidrocarburos. Actas digitales. Mar del Plata.

- Marteau, V.** 2002. Los reservorios de la Formación Rayoso. Simposio de Rocas Productivas. En: M. Schiuma, G Hinterwimmer y G. Vergani (Eds.), Rocas Reservorios de las Cuencas Productivas de la Argentina: 5° Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Mar del Plata, 511–528.
- Méndez, V., Zappettini, E. & Zanettini J.C.** 1995. Geología y metalogénesis del Orógeno Andino Central, República Argentina. Secretaría de Minería. Anales 23: 1-190. Buenos Aires.
- Mosquera, A. & Ramos V.A.** 2005. Intraplate foreland deformation in the Neuquén embayment. 6° Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Actas en CD, 28 págs. Mar del Plata.
- Natural Survey Consulting S.A.** 1996. Petrolera Argentina San Jorge S.A. Área Huantraico - Yacimiento El Trapial. Monitoreo de Obras y Tareas 1995. 75pp.
- Orchuela, I. & Ploszkiewicz, V.** 1984. La Cuenca Neuquina. IX° Congreso Geológico Argentino. Relatorio: 163-188.
- 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].
- Petrolera Entre Lomas S.A.** 2008. Informe del pozo BMo-4. Productor de agua. Neuquén.
- Ponce, J.J., Zavala, C., Marteau, M., & Drittanti, D.** 2002. Análisis estratigráfico y modelo deposicional para la Formación Rayoso (Cretácico Inferior) en la Cuenca Neuquina, Provincia del Neuquén. En: Cabaleri, N., Cingolani, C.A., Linares, E., López de Luchi, M.G., Osters, H.A. & Panarello, H.O. (Eds.). Actas del XV Congreso Geológico Argentino CD-ROM. Artículo N° 235. 6pp.
- Primo, L & González, O.A.** 1973. Relevamiento de las aguas subterráneas de la Cuenca Neuquina y su posible utilización en proyectos de recuperación secundaria y otros usos. Minería y Geología de Explotación. Yacimientos Petrolíferos Fiscales. Plaza Huincul.
- Rainoldi, A.L., Limarino, C.O., Giusiano, A., & Bouhier, E.** 2012b. Análisis estratigráfico de la Formación Huincul (Grupo Neuquén) en el prospecto Sapo Sur (37°47'S – 69°27'O), Dorso de los Chihuidos, Neuquén (abstract): XIII Reunión Argentina de Sedimentología, p. 185-186.
- Rainoldi, A., Franchini, M., Beaufort, D., Patrier, P., Giusiano, A., Impiccini, A. & Pons, M.J.** 2014. Large-scale bleaching of red beds related to upward migration of hydrocarbons: Los Chihuidos High, Neuquén Basin, Argentina. *Journal of Sedimentary Research*, 84: 373–393.

- Ramos, V.A.** 1981. Descripción geológica de la Hoja 33c, Los Chihuidos Norte, provincia del Neuquén. Servicio Geológico Nacional, Boletín 182: 1-103. Buenos Aires.
- Ramos, V.A.** 1984. Patagonia: ¿Un continente Palaeozoico a la deriva? 9º Congreso Geológico Argentino (Bariloche), Actas 2, 311–325.
- Ramos, V.A., Jordan, T.E., Allmendinger, R.W., Mpodozis, C., Kay, S.M., Cortés, J.M. & Palma, M.** 1986. Paleozoic Terranes of the Central Argentine-Chilean Andes. *Tectonics* 5. 855-880.
- Ramos, V.A.** 1999. Los depósitos sinorogénicos terciarios de la region andina. En: Caminos, R. (Ed.) *Geología Argentina*. Instituto de Geología y Recursos Minerales. Anales, 29, 651 – 682.
- Rapalini, A.E., Lopez de Luchi M., Martínez Dopico, C., Lince Klinger F., Giménez M. & Martínez, P.** 2010. Did Patagonia collide with Gondwana in the Late Paleozoic? Some insights from a multidisciplinary study of magmatic units of the North Patagonian Massif. *Geologica Acta*, 8 (4): 349-371.
- Sánchez San Román, F.J.** Hidroquímica: Conceptos elementales. Universidad de Salamanca. 11pags. (En: <http://hidrologia.usal.es>)
- Sánchez San Román, F.J.** 2014. Conceptos Fundamentales de Hidrogeología. Universidad de Salamanca. 11pags. (En: <http://hidrologia.usal.es>)
- Sánchez, M.L., Rossi, J., Morra, S. & Armas, P.** 2008. Análisis estratigráfico secuencial de las formaciones Huincul y Lisandro del Subgrupo Río Limay (Grupo Neuquén – Cretácico tardío) en el Departamento El Cuy, Río Negro. Argentina: *Latin American Journal of Sedimentology and Basin Analysis* 15: 1-26.
- Spalletti, L., Franzese, J., Matheos, S. & Schwarz, E.** 2000. Sequence stratigraphy of a tidally-dominated carbonate-siliciclastic ramp; the Tithonian of the Southern Neuquén Basin, Argentina. *Journal of the Geological Society, London*, 157, 433 – 446.
- Sticco, M.** 2014. Informe Tests iniciales del Pozo de agua AP.ww3. Ensayos de bombeo iniciales. Total Austral S.A, Neuquén.
- Sticco, M.** 2015. Informe Tests de bombeo del Pozo de agua AP.ww4. Total Austral S.A, Neuquén.
- Stipanivic, P.N., Rodrigo, F., Baulies O.L. & Martínez, C.G.** 1968. Las formaciones presenonianas del denominado Macizo Nordpatagónico y regiones adyacentes. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 23 (2) : 367-388. Buenos Aires.

- Tunik, M., Folguera, A., Naipauer, M., Pimentel, M. & Ramos, V.** 2010. Early uplift and orogenic deformation in the Neuquén Basin: constraints on the Andean uplift from U-PB and Hf isotopic data of detrital zircons. *Tectonophysics* 489(1-4): 258-273.
- Uliana, M.A., Dellapé, D.A. & Pando, G.A.** 1975a. Distribución y génesis de las sedimentitas rayosianas. (Cretácico inferior de las provincias de Neuquén y Mendoza). 2° Congreso Iberoamericano de Geología Económica, Actas 1: 151-176. Buenos Aires.
- Uliana, M.A., Dellapé, D.A. & Pando, G.A.** 1975b. Estratigrafía de las sedimentitas rayosianas. (Cretácico inferior de las provincias de Neuquén y Mendoza). 2° Congreso Iberoamericano de Geología Económica, Actas 1: 177-196. Buenos Aires.
- Vergani, G.D. Tankard, A.J., Belotti, H.J. & Welsink, H.J.** 1995. Tectonic evolution and paleogeography of the Neuquén Basin, Argentina. En: Tankard, A.J., Suárez Soruco, R. y Welsink, H.J. (Eds.) *Petroleum Basins of South America*. AAPG Memoirs, 62, 383 – 402.
- Weaver, Ch.** 1931. Paleontology of the Jurassic and Cretaceous of west central Argentina. *Memoir University of Washington* 1: 1-469. Seattle.
- Wichmann, R.** 1927. Sobre las facies lacustres Senoniana de los estratos con dinosaurios y su fauna. *Boletín de la Academia Nacional de Ciencias* 30(1-4): 383-406.
- Wonik, T. & Hinsby, K.** 2006. Borehole Logging in Hydrogeology. En: Kirsch, R., Rumpel, H.M., Scheer, W., Wiederhold, H. (Eds.): *Groundwater resources in buried valleys - a challenge for geosciences*. Leibniz Institute for Applied Geosciences. Hannover, 107-122
- Wyllie, M.R.J., Gregory, A.R. & Gardner, G.H.F,** 1958. An experimental investigation of factors affecting elastic wave velocities in porous media: *Geophysics*, 23, 459-493.
- Zamora Valcarce, G., Zapata, T., Ramos, V.A., Rodríguez, F. & Bernardo, L.M.** 2009, Evolución tectónica del frente andino en Neuquén, *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 65 (1), p. 192-203.
- Zapata, T.R. & Folguera, A.** 2005. Tectonic evolution of the Andean fold and thrust belt of the southern Neuquén Basin, Argentina. En Spalletti, L., Veiga, G., Schwarz, E. y Howell, J. (Eds.) *The Neuquén Basin: A case study in sequence stratigraphy and basin dynamics*, Geological Society, Special Publications 252: 37-56, London.
- 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 18° Congreso Geológico Argentino: 205-222, Neuquén.

**Zollner, W. & Amos A.J.** 1973. Descripción geológica de la Hoja 32 b, provincia del Neuquén. Servicio Nacional Minero Geológico, Boletín 143: 1-91, Buenos Aires.

# ANEXOS

## ANEXO 1: Valores de referencia

Tabla A1.1. Velocidad de tiempo de tránsito en rocas. Tomada del Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento (2007).

| ROCA         | Condición      | INTERVALO<br>$\Delta t_{ma}$ $\mu s/ft$ | $t_{ma}$<br>promedio<br>o |
|--------------|----------------|---|---------------------------|
| Arenisca     |                | 51.00-57.00                             | 54.00                     |
| Caliza       |                | 45.00-50.00                             | 47.50                     |
| Dolomita     |                | 40.00-45.00                             | 43.50                     |
| Anhidrita    |                | -                                       | 50.00                     |
| Halita       |                | -                                       | 66.70                     |
| Lutita       |                | 1,8-1,3                                 |                           |
|              | Sin consolidar |   | >110.00                   |
|              | Normal         |   | 100.00                    |
|              | Consolidada    |   | <90.0                     |
| Yeso         |                | -                                       | 52.50                     |
| Dunita       |                | 34.70-41.00                             | 38.20                     |
| Diabasa      |                | 44.00-46.00                             | 44.60                     |
| Gabro        |                | 42.20-47.60                             | 42.40                     |
| Granito      |                | -                                       | 50.80                     |
| Granodiorita |                | -                                       | 69.00                     |
| Serpentina   |                | -                                       | 53.9                      |
| Basalto      |                | 50.00-65.00                             | -                         |
| Cemento      |                | 83.30-95.00                             | -                         |
| Concreto     |                | 83.00-125.00                            | -                         |
| Acero        |                | -                                       | 57.10                     |
| Agua dulce   |                | -                                       | 200.00                    |

Tabla A1.2. Permeabilidad de acuerdo a la clasificación geológica e hidrogeológica, modificado de Custodio & Llamas 1983.

| PERMEABILIDAD EN (m/día)        |                   |   |  |                                 |                              |
|---------------------------------|-------------------|---|--|---------------------------------|------------------------------|
|                                 | $10^{-4}$         | $10^{-3}$                                     | $10^{-2}$                                | $10^{-1}$                       | $10^0$                       |
| CLASIFICACIÓN<br>GEOLÓGICA      | GRAVAS<br>LIMPIAS | GRAVAS Y<br>ARENAS,<br>O<br>ARENAS<br>GRUESAS | ARENAS FINAS<br>O CON MEZCLA<br>DE LIMOS | LIMOS O<br>ARCILLAS<br>ARENOSAS | ARCILLAS<br>COMPACTAS        |
| CLASIFICACIÓN<br>HIDROGEOLÓGICA | BUEN ACUÍFERO     |   | ACUÍFERO<br>POBRE                        | ACUITARDO                       | PRÁCTICAMENTE<br>IMPERMEABLE |
|                                 | $0,11$            | $0,01$  | $1,1 \cdot 10^{-3}$                      | $10^{-4}$                       | $10^{-5}$                    |
|                                 | $(m/s)$           |   |  |                                 |                              |
|                                 |                   |   | $10^{-6}$                                | $10^{-2}$                       | $10^{-10}$                   |

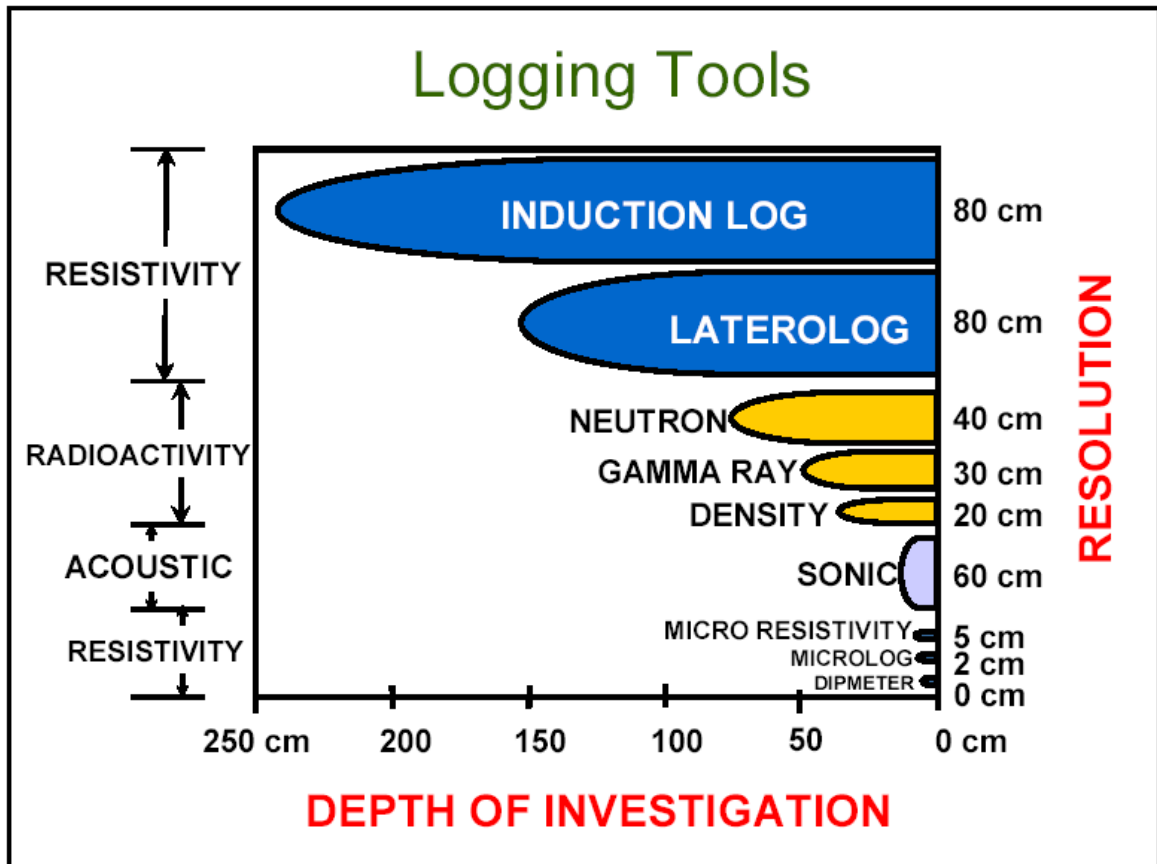


Figura A1.1. Resolución vertical vs. Profundidad de investigación de las herramientas de perfilaje.

## ANEXO 2: Información de los pozos utilizados

Tabla A2.1. Listado de pozos hidrocarburíferos y de agua utilizados con coordenadas y cota topográfica

| Pozo     | x          | y          | Cota (msnm) | Tipo de pozo        |
|----------|------------|------------|-------------|---------------------|
| DdlC-1   | 2488360,39 | 5744033,08 | 477         | Hidrocarburo        |
| DdlC-2   | 2488046,78 | 5749448,85 | 399         | Hidrocarburo        |
| DdlC-3   | 2486679,94 | 5751392,08 | 400         | Hidrocarburo        |
| DdlC-4   | 2497655,49 | 5760202,81 | 318         | Hidrocarburo        |
| DdlC-5   | 2490140,29 | 5760308,20 | 343         | Hidrocarburo        |
| DdlC-6   | 2487772,76 | 5769551,14 | 399,8       | Hidrocarburo        |
| DdlC-7   | 2485802,44 | 5769513,24 | 447,5       | Hidrocarburo        |
| DdlC-8   | 2482466,67 | 5775894,46 | 487,19      | Hidrocarburo        |
| BAñ-9    | 2506849,25 | 5794217,64 | 258,34      | Hidrocarburo y agua |
| BAñ-10   | 2515365,94 | 5799045,23 | 416         | Hidrocarburo        |
| BAñ-11   | 2506362,44 | 5783110,90 | 219,7       | Hidrocarburo y agua |
| BAñ-12   | 2527999,25 | 5796376,81 | 342         | Hidrocarburo        |
| BAñ-13   | 2515808,61 | 5768335,65 | 402,4       | Hidrocarburo        |
| BAñ-14   | 2521887,61 | 5765341,64 | 438,12      | Hidrocarburo        |
| BAñ-15   | 2525538,53 | 5765595,37 | 350,36      | Hidrocarburo        |
| BAñ-16   | 2529414,24 | 5773959,44 | 333,7       | Hidrocarburo        |
| BAñ-17   | 2537129,05 | 5788658,07 | 570,13      | Hidrocarburo        |
| AEL-18   | 2549932,50 | 5805643,08 | 529,6       | Hidrocarburo        |
| AEL-19   | 2554859,73 | 5797517,24 | 538,5       | Hidrocarburo        |
| AEL-20   | 2543443,64 | 5777303,57 | 487         | Hidrocarburo        |
| AEL-21   | 2548289,94 | 5763222,56 | 707         | Hidrocarburo        |
| DdlC.w-1 | 2479084,4  | 5750338,8  | 516         | Agua                |
| DdlC.w-2 | 2486701,4  | 5750981,7  | 395         | Agua                |
| DdlC.w-3 | 2480406    | 5780955,2  | 521,02      | Agua                |
| BAñ.w-4  | 2497844,9  | 5794791,6  | 241         | Agua                |
| BAñ.w-5  | 2512539,6  | 5789077,8  | 232,7       | Agua                |
| AEL.w-6  | 2550677    | 5802830    | 523,9       | Agua                |
| AEL.w-7  | 2541538    | 5770196    | 520         | Agua                |
| AEL.w-8  | 2540415    | 5758546    | 503,51      | Agua                |
| AEL.w-9  | 2542100    | 5747306    | 487,82      | Agua                |

### ANEXO 3: Aptitudes hidrogeológicas y análisis hidroquímicos

Tabla A3.1. Aptitudes hidrogeológicas de los pozos utilizados.

| Pozos  | Gr. Neuquén      |                  |                               | Fm. Rayoso       |                  |                               |
|--------|------------------|------------------|-------------------------------|------------------|------------------|-------------------------------|
|        | Vsh (%)<br>Prom. | PHI (%)<br>Prom. | Salinidad (eq.<br>NaCl) Prom. | Vsh (%)<br>Prom. | PHI (%)<br>Prom. | Salinidad (eq.<br>NaCl) Prom. |
| DdlC-1 | 10,14            | 20,69            | 1339                          | 16,98            | 22,035           | 1503                          |
| DdlC-2 | 21,34            | 20,04            | 2181                          | 16,21            | 22,26            | 2267                          |
| DdlC-3 |                  | 19,18            |                               | 10,45            | 19,18            | 2325                          |
| DdlC-4 |                  | 20,15            | 2294                          |                  | 20,59            |                               |
| DdlC-5 | 14,31            | 22,74            | 1350                          | 18,92            | 21,88            | 1817                          |
| DdlC-6 | 3,45             | 20,80            | 2213                          | 8,45             | 22,54            | 2574                          |
| DdlC-7 |                  | 22,23            |                               | 18,45            | 22,23            | 2406                          |
| DdlC-8 | 13,08            |                  |                               | 20,12            |                  | 978                           |
| BAñ-9  |                  | 22,92            | 2921                          |                  | 24,82            | 24884                         |
| BAñ-10 | 18,55            | 32,08            | 2094                          | 16,25            | 22,49            |                               |
| BAñ-11 | 13,93            | 27,11            | 1758                          | 19,82            | 22,83            | 2291                          |
| BAñ-12 | 18,7             | 31,18            | 2221                          | 13,56            | 21,72            |                               |
| BAñ-13 | 19,51            | 27,38            | 1790                          | 24,88            | 21,19            |                               |
| BAñ-14 | 15,19            | 39,53            | 1115                          | 13,95            | 25,91            | 1649                          |
| BAñ-15 | 14,85            | 39,56            | 1436                          | 18,59            | 25,04            | 2687                          |
| BAñ-16 | 16,11            | 39,28            | 1147                          | 12,47            | 27               | 2065                          |
| BAñ-17 | 18,55            | 29,45            | 2491                          | 14,93            | 20,05            |                               |
| AEL-18 |                  | 32               |                               |                  | 23               | 2165                          |
| AEL-19 | 18,5             | 30,94            | 1832                          | 13,21            | 23,54            |                               |
| AEL-20 | 16,36            | 26,57            | 2609                          | 10,54            | 21,56            |                               |
| AEL-21 | 14,78            | 28,63            | 2395                          | 11,58            | 23,08            |                               |

Tabla A3.2. Análisis hidroquímicos de muestras de agua (Concentración de iones en mg/l) (\*).

| Pozo     | T°C  | pH   | c25°C  | Ca <sup>+2</sup> | Mg <sup>+2</sup> | Na <sup>+</sup> | K <sup>+</sup> | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | CO <sub>3</sub> <sup>-2</sup> | Cl <sup>-</sup> | SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> | PO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> | Fe <sup>+3</sup> | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> | Densidad |
|----------|------|------|--------|------------------|------------------|-----------------|----------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|------------------|------------------------------|----------|
| DdlC.w-1 | 20.4 | 9.06 | 2250   | 5.61             | 0.72             | 386.81          |                | 309.88                        | 49.2                          | 226             | 195                           |                               | 0.26             |                              | 1.001    |
| DdlC.w-2 | 23.2 | 9.04 | 794    | 2                | 0.49             | 482.85          |                | 595.36                        | 48                            | 280             | 90                            |                               | 0.18             |                              | 1        |
| DdlC.w-4 |      |      |        | 3.6              | 2.2              | 600             | 40             | 512                           | 30                            | 570             | 110                           | 0.2                           | 0.1              | 0.1                          |          |
| BAñ.w-5  | 19.9 | 8.73 | 4081.6 | 1.6              | 0.97             | 682.09          |                | 244.07                        | 7.2                           | 428.17          | 650                           |                               | 0.07             |                              | 1        |
| BAñ.w-6  |      | 8.19 |        | 12.8             | 1.6              | 1595.7          |                | 155                           |                               | 1658.82         | 1002                          |                               | 0.062            |                              | 1.0071   |
| BAñ-18   |      | 8.1  |        | 27               | 13               | 2600            |                | 1704                          | 305                           | 2033            | 1008(*)                       |                               |                  |                              |          |
| BAñ-23   |      |      |        | 4                |                  | 875             |                | 226                           | 21                            | 500             | 950                           |                               |                  |                              | 1.001    |
| AEL.w-8  | 16   |      |        | 126              | 36               | 605             |                | 244                           |                               | 355             | 1040                          |                               | 0.2              |                              |          |
| AEL.w-9  | 21   | 10   |        | 8                |                  | 558             |                | 141                           | 48                            | 113             | 860                           |                               |                  |                              |          |