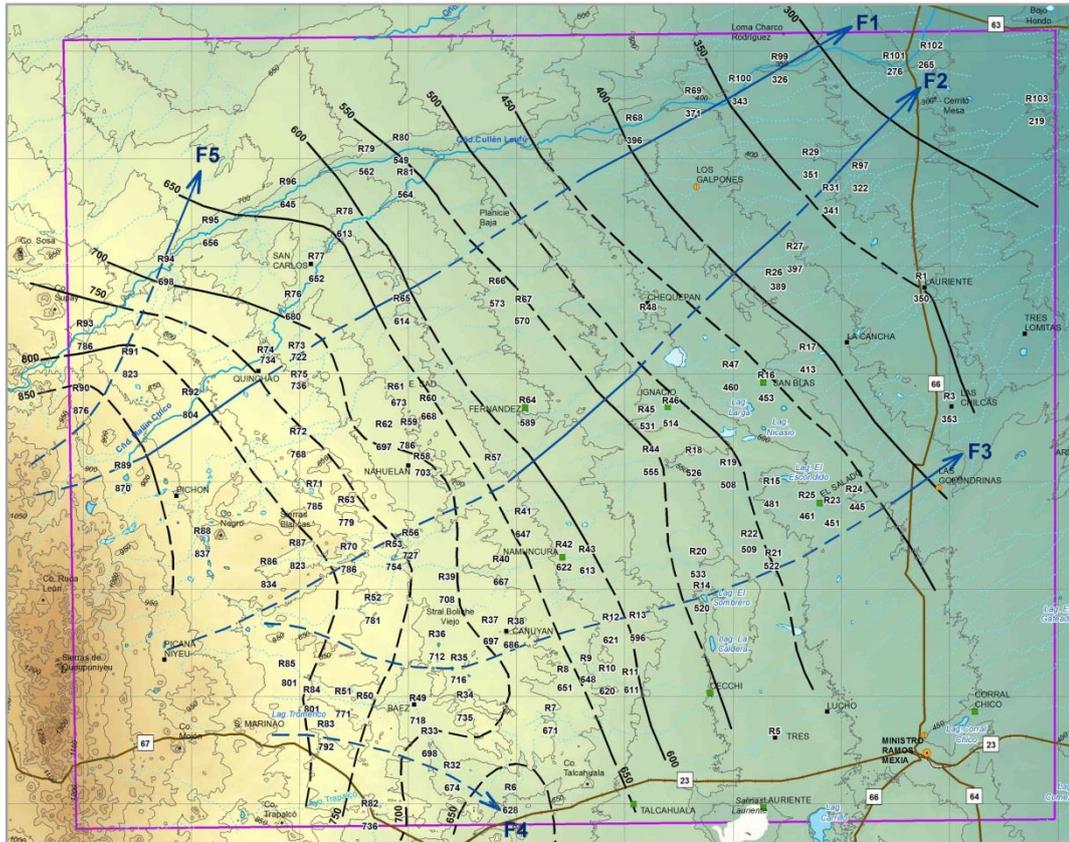


## CFI - ARSE

# ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO DE LA REGIÓN SUR DE LA PROVINCIA DE RÍO NEGRO CON ÉNFASIS EN ACUÍFEROS DE MEDIOS FISURADOS ETAPA II



### Informe Final - Ramos (Área 2)

#### AUTORES

Responsable: Dr. Geól. Miguel Auge

Lic. Geól. Jorge Gebhard

Lic. Biól. Betina Zucchini

Diciembre 2013

<b>TEMAS</b>		<b>Página</b>
1	INTRODUCCIÓN	4
2	OBJETIVO	4
3	UBICACIÓN	4
4	DEMOGRAFÍA y ECONOMÍA	7
5	CLIMA	9
6	BALANCE HÍDRICO	10
7	HIDROGRAFÍA y TOPOGRAFÍA	10
8	GEOLOGÍA e HIDROGEOLOGÍA	14
9	RELEVAMIENTO HIDROGEOLÓGICO y ESTRUCTURAL	15
10	ENSAYOS de BOMBEO	17
11	INTERPRETACIÓN CARTOGRÁFICA	22
12	HIDROQUÍMICA	25
12.1	CLASIFICACIÓN	25
12.2	APTITUD	35
13	CONCLUSIONES y RECOMENDACIONES	40
14	BIBLIOGRAFÍA	44
<b>TABLAS</b>		
1	Sierra Colorada. Lluvias totales, mensuales y anuales (1980-2012)	5
2	Sierra Colorada. Temperaturas medias, mensuales y anuales (1981-2003)	6
3	Balance Hídrico Edáfico. Método de Thornthwaite y Mather (1957)	8
6	Normas COFES. Componentes que Afectan la Salud	37
8	Aptitud del Agua para el Ganado (Cerana)	39
<b>FIGURAS</b>		
1	Depresión residual-Tiempo. Ensayo 1	19
2	Depresión residual-Tiempo. Ensayo 2	20
3	Depresión residual-Tiempo. Ensayo	21
4a	Gráfico Schoeller-Berkaloff (muestras R3 a R24)	27
4b	Gráfico Schoeller-Berkaloff (muestras R29 a R57)	28
4c	Gráfico Schoeller-Berkaloff (muestras R58 a R80)	29
4d	Gráfico Schoeller-Berkaloff (muestras R81 a R102)	30
5a	Gráfico Piper (muestras R3 a R24)	31
5b	Gráfico Piper (muestras R29 a R57)	32
5c	Gráfico Piper (muestras R58 a R80)	33
5d	Gráfico Piper (muestras R81 a R102)	34
<b>FOTOS</b>		
1	Cañadón Cuyún Leufú	9
2	Cañadón Cuyún Leufú	13

3	Afloramiento de granito rosado	14
4	Mallín con afloramiento de agua dulce	15
5	Bebedero rudimentario	40
<b>MAPAS</b>		
1	UBICACIÓN	46
2	TOPOGRÁFICO	47
3	GEOLÓGICO-HIDROGEOLOGICO	48
4	FLUJO SUBTERRÁNEO-TOPOGRAFÍA	49
5	FLUJO SUBTERRÁNEO-GEOLOGÍA	50
6	SALINIDAD-FLUJO SUBTERRÁNEO-TOPOGRAFÍA	51
7	SALINIDAD-FLUJO SUBTERRÁNEO-GEOLOGÍA	52
8	LINEAMIENTOS	53
9	DIAGRAMAS DE STIFF-FLUJO SUBTERRÁNEO	54
10	POTABILIDAD POR ACEPTABILIDAD	55
<b>ANEXOS</b>		
I	Planillas Relevamiento Hidrogeológico-Estructural	
II	Planillas Ensayos de Bombeo 1, 2 y 3	
III	Tabla 4. Índices Estructurales	
IV	Tabla 5. Análisis Químicos	
V	Tabla 7. Potabilidad	
VI	Tabla 9. Aptitud para el Ganado	

# RAMOS - ÁREA

## 1. UBICACIÓN

El ámbito estudiado se ubica en el Departamento 9 de Julio y ocupa 6.675 km<sup>2</sup>. En el Mapa 1, además de la ubicación, se indican los rasgos fisiográficos principales, los asentamientos urbanos y rurales, y la red vial principal y secundaria.

## 2. DEMOGRAFÍA Y ECONOMÍA

De acuerdo al último censo nacional de población del 2010 (INDEC, 2012), el Departamento 9 de Julio tenía 3.475 habitantes, lo que representa sólo el 0,54% del total provincial (638.645). Sierra Colorada, que se ubica en la vecindad Sur, pero por fuera de la zona en estudio, es la ciudad cabecera del Departamento con unos 1.500 habitantes y Ministro Ramos Mexía, en el vértice SE, le sigue en importancia con alrededor de 1.000 habitantes.

La economía principal se basa en la explotación ganadera, principalmente ovina y secundariamente vacuna, pero dado que los campos están dominados por un sotobosque (monte bajo) xerófito, típico de zonas áridas, con una vegetación espinosa, la disponibilidad de alimento para el ganado es muy escasa. Esto, junto con la escasez de agua, hacen que la carga máxima promedio de hacienda sea de 1 oveja cada 5 hectáreas y de una vaca cada 20 (Auge et al, 2013 a).

Otros aprovechamientos económicos están vinculados a la minería, pero a escala muy reducida. Al respecto se puede citar, según información brindada por la Dirección Provincial de Minería:

- Mina “Mago” de oro diseminado (no está en explotación).
- Cateos de Primera Categoría (prospecciones): “Intrépido I y II”, “Parra”, “Castillo”, “Cucho”, “Río de Oro 3”.
- Manifestaciones de oro y cobre diseminados: “Epu”, “Micerino”, “Don Stube”.
- Canteras de ripio y de arcilla.

Además, hacia el NE, fuera del área estudiada, existen manifestaciones de descubrimientos de minerales de uranio, vanadio, litio y bario.

## 3. CLIMA

Es el que caracteriza a la mayor parte de la Patagonia Extra-Andina o Meseta Patagónica, con vientos fuertes y secos del Oeste, escasa precipitación y muy alta

evapotranspiración, lo que deriva en un marcado déficit en el balance hídrico y, por ende, escasa disponibilidad de agua.

En la Estación Meteorológica Sierra Colorada (67° 45' 13" O 40° 35' 16" S), aledaña al límite Sur de la zona estudiada, se registró una **precipitación media anual** de 225 mm para el lapso 1980-2012, con algunos registros faltantes parciales (1980, 81, 92, 93, 94, 97) y otros totales (1995, 96) (Tabla 1). Los meses más llovedores, considerando el promedio en el período citado, fueron: Marzo (26 mm), Mayo (25), Octubre (22), Febrero (21) y Diciembre (20 mm), lo que totaliza el 51% de la media total anual (225 mm) e indica una dispersión entre el otoño, la primavera y el verano.

<b>TABLA 1</b>													
<b>SIERRA COLORADA</b>													
<b>Lluvias Totales Mensuales y Anuales (1980 – 2012)</b>													
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Prom.
1980	39			54	33	10	9	6					
1981	36		34	16	19	21		5		5	5		
1982	4	33	11	31	16	61	61	6	44	5	5	38	311
1983	14	4	16	22	21	17	0	0	3	0	0	39	135
1984	2	3	78	1	42	57	55	29	27	7	26	51	377
1985	67	6	28	0	21	7	6	5	6	57	1	30	232
1986	0	0	0	0	21	0	8	14	18	18	0	0	78
1987	20	49	105	0	0	0	38	30	0	37	0	16	294
1988	17	15	16	6	13	19	0	5	39	6	0	0	135
1989	0	0	12	0	7	21	2	6	0	19	4	0	70
1990	38	44	38	28	8	0	0	4	28	8	4	0	198
1991	1	0	0	0	29	6	37	1	59	6	37	40	215
1992	97	4	122	26	40	20	4	20	0	12			345
1993	4	122	26							143	52		347
1994										13	4	5	
1995													
1996													
1997						38	2	5	19	22	16	51	153
1998	0	29	6	42	40	27	0	0	0	0	6	5	153
1999	8	9	42	121	34	10	22	7	25	11	119	0	407
2000	13	10	7	5	31	42	0	18	14	68	8	2	217
2001	0	0	11	10	105	15	18	5	67	59	15	8	312

2002	0	5	19	8	45	6	0	11	13	4	23	13	146
2003	30	0	34	17	35	24	7	5	7	0	25	7	191
2004	5		26	21	29	21	50	3	0	49	39		242
2005	11	37	0	18	16	28	25	41	10	30	7	112	333
2006	5	66	4	23	13	21	62	13	0		2	0	208
2007	27	0	30	0	0	0	1	0	65	9	8	0	140
2008	0	24	5	9	53	11	0	19	3	0	0	78	201
2009	10	0	5	0	18	8	9	30	9	20	8	3	119
2010	0	46	30	4	12	3	0	0	52	13	0	9	168
2011	0	40	9	6	1	0	7	33	3	13	8	17	135
2012	55	11	17	12	4	8	2	12		16	12	4	153
<b>Prom.</b>	<b>17</b>	<b>21</b>	<b>26</b>	<b>17</b>	<b>25</b>	<b>17</b>	<b>15</b>	<b>11</b>	<b>19</b>	<b>22</b>	<b>15</b>	<b>20</b>	<b>225</b>

Entre 2006 y 2012 se aprecian lluvias menores al promedio anual, lo que señala la persistencia de un período seco de 7 años continuados, con un registro mínimo de 119 mm en 2009.

La **temperatura media anual** (1981-2003) fue de 12,9 °C, considerando sólo los años con registros completos, con Enero como el mes más cálido (promedio 21,6) y Julio como el más frío (promedio 4,1 °C) (Tabla 2).

<b>TABLA 2</b>													
<b>SIERRA COLORADA</b>													
<b>Temperaturas medias, mensuales y anuales (1981-2003)</b>													
<b>Año</b>	<b>Ene</b>	<b>Feb</b>	<b>Mar</b>	<b>Abr</b>	<b>May</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Sep</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Dic</b>	<b>Prom.</b>
1981	20,0	20,6	21,1	13,9	13,1	7,5				16,7	15,9	21,3	
1982	24,6	20,2	19,2	13,6	10,1	4,1	1,8	6,1	9,2	12,1	16,8	22,0	<b>13,3</b>
1983	23,3	20,1	17,8	12,8	6,9	2,2	4,2	5,5	8,8		20,8	23,1	<b>13,2</b>
1984	23,4	19,3	17,3	11,9	6,3	1,1	1,7	5,2	9,2	13,1	15,7	17,7	<b>11,8</b>
1985	20,3	20,5	16,7	13,1	8,5	6,5	5,6	7,5	10,9	11,9	20,2	23,3	<b>13,8</b>
1986					9,2		5,3	5,1	8,5	14,3	17,4	21,6	
1987	24,1	22,8	16,7	13,1	7,7	6,4	6,5	6,2	7,3	7,7	15,8	16,5	<b>12,6</b>
1988	18,0	20,0	16,1	10,1	5,1	4,3	2,4	5,3	6,8	10,3	16,0	18,6	<b>11,1</b>
1989	23,9	30,6	19,7	15,0	8,9	6,4	4,6	6,9	8,9	14,6	18,3	20,0	<b>14,8</b>

1990	24,0	20,4	14,0	11,3	9,1	7,3	3,3	5,5	9,5	16,1	19,6	22,5	<b>13,5</b>
1991	22,9	24,0		15,5	10,1	6,0	4,1	7,2	11,1	13,3	15,6	15,5	<b>13,2</b>
1992	23,8	21,0	19,7	13,2	8,5	4,1	2,9	8,2	12,8	13,5	15,9	19,3	<b>13,6</b>
1993	19,6	21,3	15,7	11,6	5,7	3,8		12,0	13,4	17,2			
1994					15,6	6,8	8,6	14,1		12,8	18,4	21,6	
1995	18,4	14,8	17,8										
1996													
1997													
1998													
1999				10,5	7,5	4,7	2,8	6,2	9,6	13,4	17,2	18,8	
2000	21,0	18,1	18,7							12,1	15,4	18,5	
2001	17,9	18,6	14,6	11,9	8,2	6,1	2,8	6,6	8,5	13,4	15,4	19,6	<b>12,0</b>
2002	21,0	20,6	15,0	11,9	7,4	3,0	5,0	5,5	8,0	12,5	17,0	20,5	<b>12,3</b>
2003				11,2	8,4	5,3			8,9	10,2	12,5		
Prom.	21,6	20,8	17,3	12,5	8,7	5,0	4,1	7,1	9,5	13,1	16,9	20,0	<b>12,9</b>

Los **vientos dominantes** se dan en primavera y verano, predominantemente del cuadrante O, son de moderada a alta intensidad y su actividad favorece el aumento de la evapotranspiración.

#### 4. BALANCE HÍDRICO

El balance hídrico a nivel edáfico fue ideado por Thornthwaite (1948), mejorado por Thornthwaite y Mather (1955) y, finalmente, por Thornthwaite y Mather (1957). En la Tabla 3 se indica el desarrollo del mismo, siguiendo la metodología de 1957, sobre la base de las temperaturas medias mensuales (1981-2003) y las lluvias medias mensuales (1981-2012) registradas en la Estación Meteorológica Sierra Colorada.

La **evapotranspiración potencial media anual (Etp)** fue de 725 mm, lo que deriva en una deficiencia potencial de agua de 500 mm respecto a la lluvia media (P) que fue de 225 mm/a. Considerando valores medios mensuales, Mayo, Junio y Julio, registran excesos ( $P > Etp$ ), pero que conjunto, sólo alcanzan a 12 mm.

<b>TABLA 3</b>													
<b>BALANCE HÍDRICO EDÁFICO</b>													
<b>Método de Thornthwaite y Mather (1957)</b>													
	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Año
<b>T °C</b>	21,6	20,8	17,3	12,5	8,7	5,0	4,1	7,1	9,5	13,1	16,9	20,0	12,9
<b>I</b>	8,78	8,66	6,55	4,00	2,31	1,00	0,74	1,70	2,64	4,30	6,32	8,16	55,2
<b>Etp sa</b>	3,4	3,3	2,5	1,6	0,9	0,5	0,4	0,7	1,1	1,7	2,5	3,1	
<b>Fc</b>	38,1	31,8	32,1	27,9	25,8	23,4	25,2	27,6	30,0	34,5	36,0	38,7	
<b>Etp</b>	129	105	80	45	23	12	10	19	33	59	90	120	725
<b>P</b>	17	21	26	17	25	17	15	11	19	22	15	20	225
<b>P-Etp</b>	-112	-84	-54	-28	<b>2</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	-8	-14	-37	-75	-100	-500
<b>Pp aa</b>	-346	-430	-484	-512				-8	-22	-59	-134	-234	
<b>A</b>	3	1	1	1	3	8	13	92	80	54	25	9	
<b>Va</b>	-6	-2			2	5	5	79	-8	-26	-29	-38	
<b>Etr</b>	23	23	26	17	23	12	10	19	27	48	44	58	330
<b>D</b>	106	82	54	28	0	0	0	0	6	11	46	62	395
<b>E</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

I: índice calórico **Etp sa**: evapotranspiración potencial sin ajustar **Fc**: factor de corrección  
**Etp**: evapotranspiración potencial **P**: precipitación **Pp aa**: pérdida potencial de agua acumulada  
**A**: agua almacenada **Va**: variación de agua almacenada **Etr**: evapotranspiración real  
**E**: exceso **D**: déficit

Todas la variables salvo **T**, **I** y **Fc** están expresadas en mm

Para la **capacidad máxima de almacenamiento de agua en el suelo o capacidad de campo (Cc)** se eligió preliminarmente una lámina de 100 mm, sujeta a revisión, dado que la cobertura edáfica es muy discontinua debido a la existencia de extensos afloramientos rocosos.

Del balance surge también una marcada deficiencia de agua al comparar la **evapotranspiración real (Etr)** que fue de 330 mm/a, respecto a la precipitación (225 mm/a), lo que deriva en un déficit de 105 mm/a\*. Este déficit, sin embargo, no se condice con la existencia de agua subterránea a poca profundidad, en la gran mayoría de los pozos censados, con un promedio de 7,4 m, aún después de que en los 7 últimos años dominó un marcado déficit en las precipitaciones. **Lo antedicho es un claro indicador de la existencia de recarga subterránea.**

\* El déficit (D) indicado en la Tabla 3 (395 mm/a) es una variable diferente, pues es el definido por Thornthwaite como la diferencia entre la evapotranspiración potencial y la real, y tiene una finalidad agronómica porque apunta a establecer la necesidad de aplicar riego.

## 5. HIDROGRAFÍA

La red hidrográfica de la región está dominada por cañadones secos la mayor parte del año, que sólo conducen agua en coincidencia con fuertes lluvias y por lagunas, la gran mayoría de carácter temporario.

Los cañadones son la expresión de un clima mucho más húmedo que el actual que, conjuntamente con el derretimiento del hielo en los períodos post-glaciales, permitieron la formación por erosión, de las depresiones lineales que los caracteriza. Precisamente es en la vecindad de sus vaguadas, donde el agua subterránea posee menor salinidad y se ubica a menor profundidad.

El cañadón más importante es Cullen Leufú (Foto 1), que atraviesa la región en estudio siguiendo la pendiente topográfica regional, o sea de SO a NE, recibiendo



Foto 1. Cañadón Cuyún Leufú. Ubicación R102.

como afluente por su margen derecha al Cañadón Mallín Chico (Mapa 2). De menor trascendencia regional, es un grupo numeroso de cañadones emplazados en el sector NE del ámbito estudiado. Al Cañadón Cullen Leufú (Hoja Topográfica 3966-31, 1:100.000, IGM 1985) también se lo conoce como Cuyún Leufú (Hoja Geológica 4169-II, 1:250.000, SEGEMAR 2001)

La condición hidrográfica citada (ausencia dominante de escurrimiento) hace prácticamente imposible la medición de caudales, incluso en los cortos lapsos en que se producen fuertes avenidas.

Dentro de las lagunas se destacan: La Caldera, Larga, Nicasio, El Escondido, El Sombrero, y en el límite Sur de la zona, la Laguna Carriló y la Salina Lauriente.

## 6. GEOMORFOLOGÍA

La región considerada se emplaza dentro del ambiente regional de **Mesetas y Planicies** y localmente se corresponde con la geoforma denominada **Peneplanicie Exhumada de Río Negro** (González Díaz y Malagnino, 1984), que es una superficie de erosión labrada en las rocas graníticas del Paleozoico superior y en las vulcanitas del Triásico, posteriormente sepultada y finalmente exhumada y disectada durante el Terciario y el Cuaternario, con una notoria predominancia de procesos exógenos en su formación.

La mayor resistencia frente a la erosión de las rocas paleozoicas y triásicas, respecto a los sedimentos cenozoicos, hace que predomine un relieve invertido; por lo tanto, las unidades geológicas más antiguas se ubican en ámbitos topográficos más elevados que las más modernas.

La pendiente topográfica regional es hacia el NE, con una progresiva desviación hacia el E, como se aprecia en la traza del Cañadón Cullen Leufú (Mapa 2). La superficie tiene una forma suavemente cóncava, con las mayores cotas (hasta 1.300 m) en el vértice SO (Sierra Queupuniyeu) y las menores en el vértice NE (Bajo Hondo), con altitudes del orden de 250 m. El gradiente disminuye de 625 m/km, en el sector serrano a 5 m/km en el NE, con un valor medio entre la "pie de la sierra" y el "bajo" de 7,4 m/km.

## 7. GEOLOGÍA e HIDROGEOLOGÍA

Con el objeto de disponer de una descripción de las unidades geológicas que sea de utilidad para la hidrogeología, se agruparon las primeras en función de su capacidad para admitir, almacenar y transmitir agua. Así, en el Mapa 3 se diferenciaron las **rocas cristalinas** (granitos y vulcanitas) de los **sedimentos** y de las **sedimentitas**. Las primeras, porque en general generan un medio discontinuo, en el que el agua sólo se presenta en las superficies de debilidad (fallas, diaclasas),

mientras que el resto del cuerpo de la roca, debido a la cristalización masiva, es prácticamente impermeable. Los sedimentos pueden almacenar y transmitir agua a través de los poros existentes entre los granos, generando un medio hidráulico continuo. Las sedimentitas, o rocas sedimentarias, suelen conformar un medio que combina los dos 2 anteriores; o sea, pueden almacenar agua en superficies de debilidad, pero también por fuera de dichas superficies, cuando el cuerpo de roca tiene espacios porales, aunque estos en general, se presentan en una proporción mucho menor que en los sedimentos. Los **basaltos** del Neógeno, merecen un tratamiento especial, pues si bien están dentro de la categoría de rocas por su grado de litificación, debido a su estructura alveolar, tienen un significativo interés hidrogeológico, pues constituyen vías preferenciales para la recarga subterránea.

Esta clasificación, como sucede con la mayoría de las que se aplican a procesos o componentes naturales, sólo brinda una aproximación respecto al comportamiento que se desea investigar y, en definitiva, son de mayor utilidad para encasillar artificialmente la variable natural, que para dilucidar con certeza su comportamiento. Esta consideración asume mayor vigencia cuando al comportamiento reconocido sólo a nivel local, se lo intenta aplicar a un ámbito de extensión regional (Auge et al, 2013).

Se describen a continuación las características geológicas y el comportamiento hidrogeológico general de las unidades mencionadas previamente, comenzando por la más moderna.

**Sedimentos continentales.** Comprenden a los Rodados Patagónicos del Pleistoceno y a los depósitos aluviales, eólicos, coluviales y lagunares, del Holoceno y Reciente. Predominan en los sectores SE y N del ámbito estudiado y están integrados por arenas, gravas, gravillas, limos, arcillas, aglomerados y conglomerados. Se los aprovecha para la captación de agua mediante pozos cavados de poca profundidad, en la vecindad de los cauces de cañadones como el Cullen Leufú (pozos R79, R80, R95, R96, R101 – Mapa 7, donde registran salinidades totales (SDT) menores a 2.500 mg/L, aunque también se da que superen los 4.000 mg/L (R68, R69, R99, R100). Los Rodados Patagónicos tienen gran desarrollo, cubriendo prácticamente la totalidad del área, aún en mantos delgados, generalmente discontinuos, por encima de los afloramientos rocosos. Su mayor manifestación vertical se da cubriendo a los abanicos aluviales ubicados al N del

Cañadón Cullen Leufú y al extenso abanico aluvial de la Loma de los Leones, en el sector SE del área estudiada (Mapa 7). Los Sedimentos continentales, en afloramientos continuos, ocupan 2.838 km<sup>2</sup>, lo que representa la mayor manifestación superficial, con el 43% de la superficie total relevada (6.675 km<sup>2</sup>).

**Basaltos.** Integran el llamado Complejo Queupuniyeu (Oligoceno superior a Mioceno medio), constituido por basaltos olivínicos, basanitas y nefelinitas. Ocupan el ámbito de la Sierra Queupuniyeu en el sector SO del área estudiada y, en menor proporción, el sector SE, en Talcahuala y conformando el sustrato de la ciudad Ministro Ramos Mexía (Mapa 3). Los basaltos se apoyan sobre rocas graníticas y volcánicas, y aparecen rodeados por los Sedimentos continentales, que son más modernos, pero que se ubican a menor altitud. Debido a su profusa estructura alveolar, poseen un trascendente interés hidrogeológico, pues constituyen vías preferenciales para la recarga subterránea. Dado que no se censó ningún pozo en basalto, no se puede establecer con certeza su comportamiento hidroquímico; sin embargo, es previsible que el agua subterránea asociada tenga baja salinidad, especialmente en la Sierra Queupuniyeu, pues la misma constituye el principal ámbito de recarga de la zona estudiada. La unidad basaltos ocupa 151 km<sup>2</sup>, lo que representa sólo el 2% del área relevada.

**Sedimentitas continentales.** Están representadas por el Grupo Neuquén indiferenciado, del Cretácico superior y constituidas por areniscas, areniscas conglomerádicas, conglomerados y fangolitas (Foto 2), de origen predominantemente fluvial. Afloran en el sector NE y en la margen N del Cañadón Cullen Leufú y generalmente se encuentran cubiertas por una delgada capa de Sedimentos continentales. Los pozos muestreados en las Sedimentitas continentales (R3, R97), dieron SDT elevados (6.820 y 3.816 mg/L). Cubren 817 km<sup>2</sup> (12% del ámbito estudiado).

**Vulcanitas.** Se incluye en esta denominación a un complejo volcánico-sedimentario, con predominio del primero. Están formadas por ignimbritas, tobas-riolíticas, andesitas, riolitas y areniscas tobáceas, pertenecientes al Complejo Los



Foto 2. Molino en Cañadón Cuyún Leufú; al fondo afloramiento de sedimentitas cretácicas en la margen derecha del cañadón. Ubicación R102.

Menucos de edad Triásica-Jurásica inferior (Cucchi et al, 2001). Afloran en gran parte del área estudiada, ocupando 2.357 km<sup>2</sup> (35% del área relevada). La mayoría de los pozos censados están comprendidos en esta unidad y de su muestreo se desprende que el agua asociada tiene SDT: **bajos** (menores a 1.000 mg/L) (pozos R7, R8, R36, R37), **medios** (entre 2.000 y 2.500 mg/L) (pozos R12, R13, R57) y **altos** (mayores a 6.000 mg/L) (R64) y **muy altos** (mayores a 14.000 mg/L) R19, R21 y R22. Existen varios pozos que cumplen con algunas de las condiciones, respecto a la salinidad total citadas previamente, y que en el Mapa 7 aparecen dentro del ámbito de Vulcanitas, pero que en las fichas de censo se corresponden con depósitos aluviales, por lo que no fueron incluidos en la clasificación. Esta aparente contradicción, se debe a la escala empleada en el mapa (1:280.000), que no permite diferenciar formas menores a 280 m de extensión.

**Granitos.** Comprenden a granitos y granodioritas, a los que en la Hoja Geológica 4169-II (Los Menucos), se los denomina Granodiorita Prieto, pertenecientes al Complejo La Esperanza de edad Pérmica (Foto 3). Conforman los afloramientos más antiguos reconocidos en el ámbito estudiado y el agua subterránea asociada presenta salinidades totales: **bajas** (pozos R90, R92), **medias**



Foto 3. Afloramiento de granito rosado perteneciente al Complejo La Esperanza del Pérmico. Ubicación R90.

(R66, R72, R91) y **altas** (R18, R19). Los afloramientos de esta unidad ocupan 512 km<sup>2</sup> (el 8% del área relevada).

## 8. MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL

Teniendo en cuenta: los componentes geológicos y topográficos que caracterizan a la región, las variaciones en la profundidad del nivel del agua, las características del flujo y las propiedades hidroquímicas subterráneas, se puede postular un esquema hidrogeológico conceptual en el que se distinguen claramente 2 tipos de acuíferos.

Uno **somero**, situado en los bajos topográficos, donde se concentra el flujo superficial, generado por la lluvia, que actúa como factor principal de recarga y que en general se caracteriza por salinidades de medias a bajas (menores a 3.000 mg/L). Tiene forma lenticular, es del tipo libre o freático, e incluso, en algunos casos, del tipo colgado. Se emplaza tanto en sedimentos como en rocas, se caracteriza por flujos subterráneos locales y se lo aprovecha mediante pozos cavados de poca profundidad, ubicados en ambientes deprimidos del relieve, como cañadones, mallines (Foto 4) y bajos. Ejemplos son los pozos R93, R94, R95 y R96, ubicados en el Cañadón Cullen Leufú y los pozos R76, R77, R78, R89 y R92, ubicados en el Cañadón Mallín Chico.



Foto 4. Mallín con afloramiento de agua de bajo tenor salino, desarrollado en riolitas del Complejo Los Menucos de edad Triásica-Jurásica inferior. Ubicación R70.

Otro más **profundo**, subyacente al anterior, está contenido en roca, manifiesta un flujo regional SO-NE, con una zona de recarga principal en la Sierra Queupuniyeu. Las mayores salinidades, superiores 3.000 mg/L, coinciden predominantemente con los sectores medios y distantes, considerando el recorrido del flujo subterráneo regional (pozos R3, R14, R15, R16, R17, R18, R19, R21, R22, R23, R24, R27, R29, R31, R44, R47, R59, R60, R61, R62, R64, R65, R68, R69, R71, R83, R97, R99, R100) y las menores, inferiores a 1.500 mg/L, con los sectores ubicados hacia el ámbito de recarga principal (Sa. Queupuniyeu) (pozos R84, R85, R86, R87, R89, R90. También se dan bajas salinidades en sectores intermedios y distantes del flujo subterráneo mencionado, debido a procesos de recarga local en el acuífero somero (R8, R9, R11, R20, R25, R58, R76, R77, R78, R81).

## 9. RELEVAMIENTO HIDROGEOLÓGICO - ESTRUCTURAL

Debido a que en el Área 2 existe una importante cobertura superficial de unidades rocosas, al censo hidrogeológico clásico, consistente en la medición de niveles piezométricos y toma de muestras de agua, se le agregó un registro geológico-estructural en los afloramientos que se consideraron representativos. En los mismos se identificó el tipo de roca (granito, riolita, arenisca, conglomerado), se

midió el rumbo y el buzamiento de las discontinuidades que las caracterizan (diaclasamiento) y su tamaño (longitud, abertura). Este último relevamiento se justifica plenamente toda vez que en medio rocoso, el agua se mueve predominantemente a través de las discontinuidades y, en ellas, los caudales normalmente son proporcionales a la 3ra. potencia del ancho de la abertura (Auge et al, 2013).

En la Tabla 4 - Anexo III, se indica el tipo de roca (granito, riolita, dacita); el tipo de estructura (diaclasa); el rumbo y el buzamiento; la abertura, la separación y la densidad de las estructuras medidas; y se propone una clasificación en 7 clases, sobre la base de un índice estructural (**IE**), que surge de **multiplicar la abertura<sup>2</sup> x la densidad**. De la misma se desprende que considerando a las clases en forma individual, o sea sin combinaciones, predomina la **A** con el 41% de las estructuras medidas (64), seguida de la **0** con el 8% y la **B** con el 3%. Si se consideran las combinaciones, la más frecuente es la **A-F** con el 14%, seguida por **A-E** con el 13% y **A-C** con el 11%.

De los valores de **IE** asignados a las 7 clases indicadas en la Tabla 4 se desprende que la más trascendente respecto al flujo subterráneo es la **F** (**IE** > 5.000) y la menos importante es la **0** (sin abertura).

La caracterización estructural mencionada, se reproduce cartográficamente en el Mapa 3, mediante la ubicación y la orientación espacial (rumbo y buzamiento) de las estructuras que poseen mayor interés hidrogeológico, o sea las que tienen la gama más amplia de índices estructurales; esto para evitar el empastamiento que hubiere resultado de representar todas las estructuras medidas.

Resulta importante señalar que la metodología descrita es válida para las condiciones estructurales reconocidas en superficie, pero que lamentablemente en la mayoría de los casos no se puede extrapolar con certeza a la tercera dimensión, porque no se dispone del conocimiento respecto al comportamiento estructural en profundidad.

La mayor parte del censo hidrogeológico-estructural, estuvo a cargo de los Lic. Geól. Gustavo Olivares y Aldo Sisul del DPA y del Téc. Gustavo Bertorello, y permitió la identificación de 94 captaciones de agua subterránea, 2 manantiales y 28 afloramientos rocosos (Anexo I - Planillas del Censo Hidrogeológico-Estructural).

Los puntos de agua censados respecto a la superficie relevada, resulta en una distribución de 1 pozo cada 71 km<sup>2</sup>, aunque existen algunos sectores con notoria ausencia de pozos, como el SE y el NO.

Restando las cotas topográficas, obtenidas mediante GPS barométrico en las bocas de los pozos, a las profundidades del agua, medidas con sonda piezométrica graduada al cm, se obtuvieron las cotas hidráulicas de la superficie freática, que figuran en las planillas de censo. Con dichos valores se elaboraron las curvas equipotenciales y las direcciones del flujo subterráneo (mapas 4 y 5).

## 10. ENSAYOS DE BOMBEO

Se realizaron 3 ensayos de bombeo en pozos cavados, dos de ellos en rocas y el restante en sedimentos aluviales del Cañadón Cuyún Leufú.

**Ensayo 1.** Se realizó en el pozo cavado en roca granítica R64 de 10,1 m de profundidad y 1,5 m de diámetro, con sólo 95 cm de columna de agua inicial, lo que resulta en un volumen almacenado de 1,7 m<sup>3</sup>. El nivel estático registró 9,15 m\*. El caudal medio fue de 3 m<sup>3</sup>/h y la depresión máxima de 0,61 m al cabo de 40' de bombeo. Al finalizar la recuperación (1.370'), todavía faltaban 11 cm para alcanzar el nivel estático de partida. Asumiendo el ritmo de recuperación registrado en de los últimos 1010' (35 cm), aun restarían otros 317' para recuperar los 11 cm residuales. Por lo tanto, la recuperación total debiera insumir unos 1700' (1,2 días), lo que indica un ritmo muy lento de recuperación, producto de un aporte muy escaso por parte del acuífero contenido en la roca granítica.

En la planilla del Anexo II - Ensayos de Bombeo, se vuelcan los niveles medidos durante el bombeo, durante la recuperación, las depresiones y las depresiones residuales.

En la Figura 1 se representan las depresiones residuales en relación aritmética versus los  $t/t'$  en relación logarítmica y de la misma surge un pobre alineamiento de puntos entre 180 y 360', recta a partir de la cual se obtiene una transmisividad  $T = 6,2 \text{ m}^2/\text{d}$ , valor que por lo expresado al tratar el punto 3 (Metodología), sólo puede asumirse como orientativo.

\* Todos los niveles hidráulicos medidos en los ensayos de bombeo están referidos a las bocas de los pozos

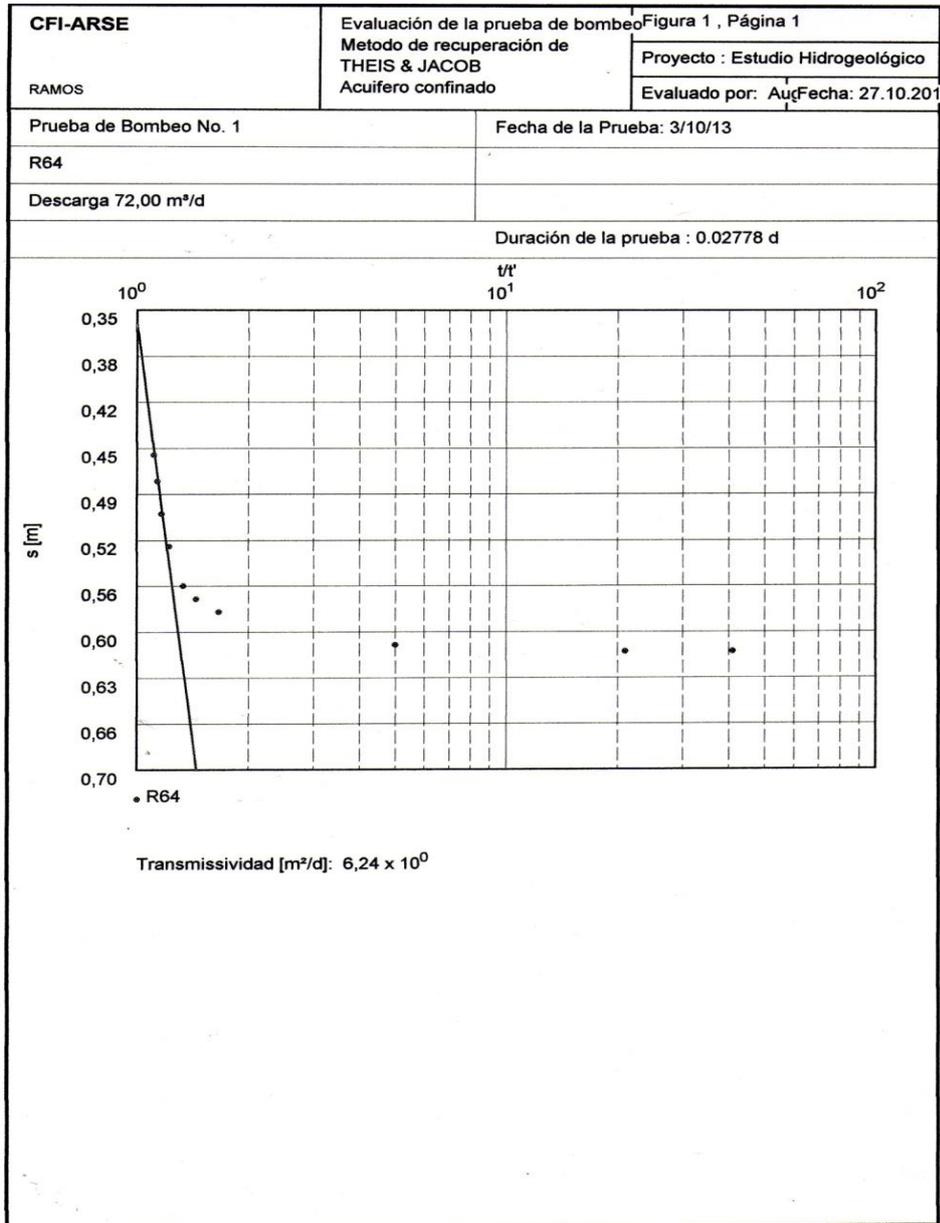
**Ensayo 2.** Se efectuó en el pozo R61, cavado en riolita, de 5,2 m de profundidad y 1,4 m de diámetro. La columna de agua, antes de iniciar la extracción, registró un espesor de 1,9 m lo que indica un volumen almacenado de 2,9 m<sup>3</sup>. Se partió de un nivel estático de 3,27 m y al cabo de 240' de bombeo se alcanzó un dinámico de 4,03 m, con una depresión de 1,06 m, para un caudal de 3,3 m<sup>3</sup>/h. La recuperación fue muy lenta debido al escaso ingreso de agua; considerando el ritmo de recuperación de los últimos 60' (5 cm), los 77 cm faltantes para alcanzar el nivel estático, deberían insumir 924', que agregados a los 240' iniciales dan 1164' (19 hs.). Como en el caso anterior (granito), en este, la riolita también genera un aporte muy escaso, indicativo de un acuífero muy pobre.

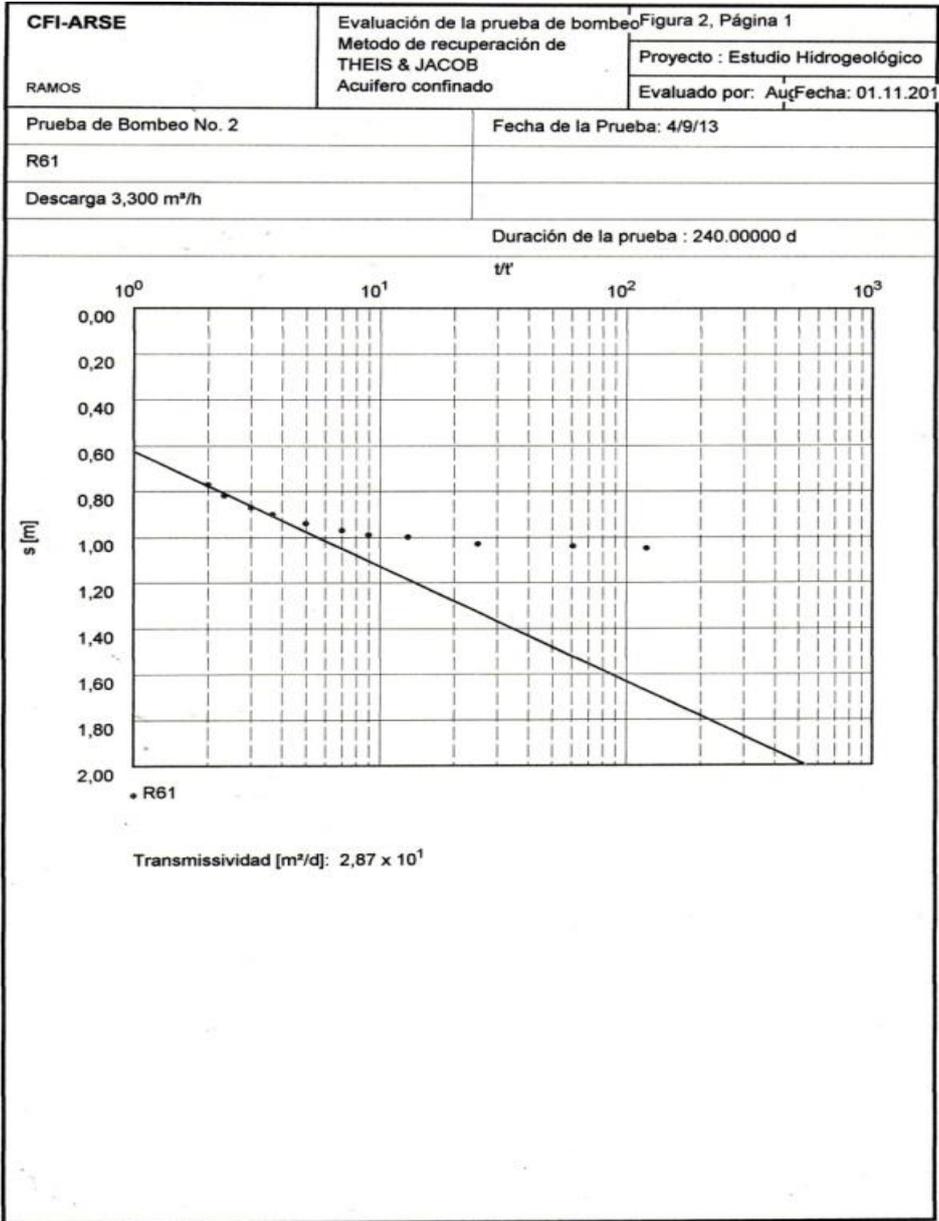
En la Figura 2 se representa a la depresión residual ( $s'$ ) en el eje Y (aritmético) y a los  $t/t'$  en el eje X (logarítmico), y en la misma se visualiza un regular alineamiento en los últimos 4 puntos registrados para la recuperación, pero la recta resultante corta al eje X en un valor menor a 1, por lo que la resolución del método carece de representatividad y por ende también, el valor calculado para la transmisividad (29 m<sup>2</sup>/d).

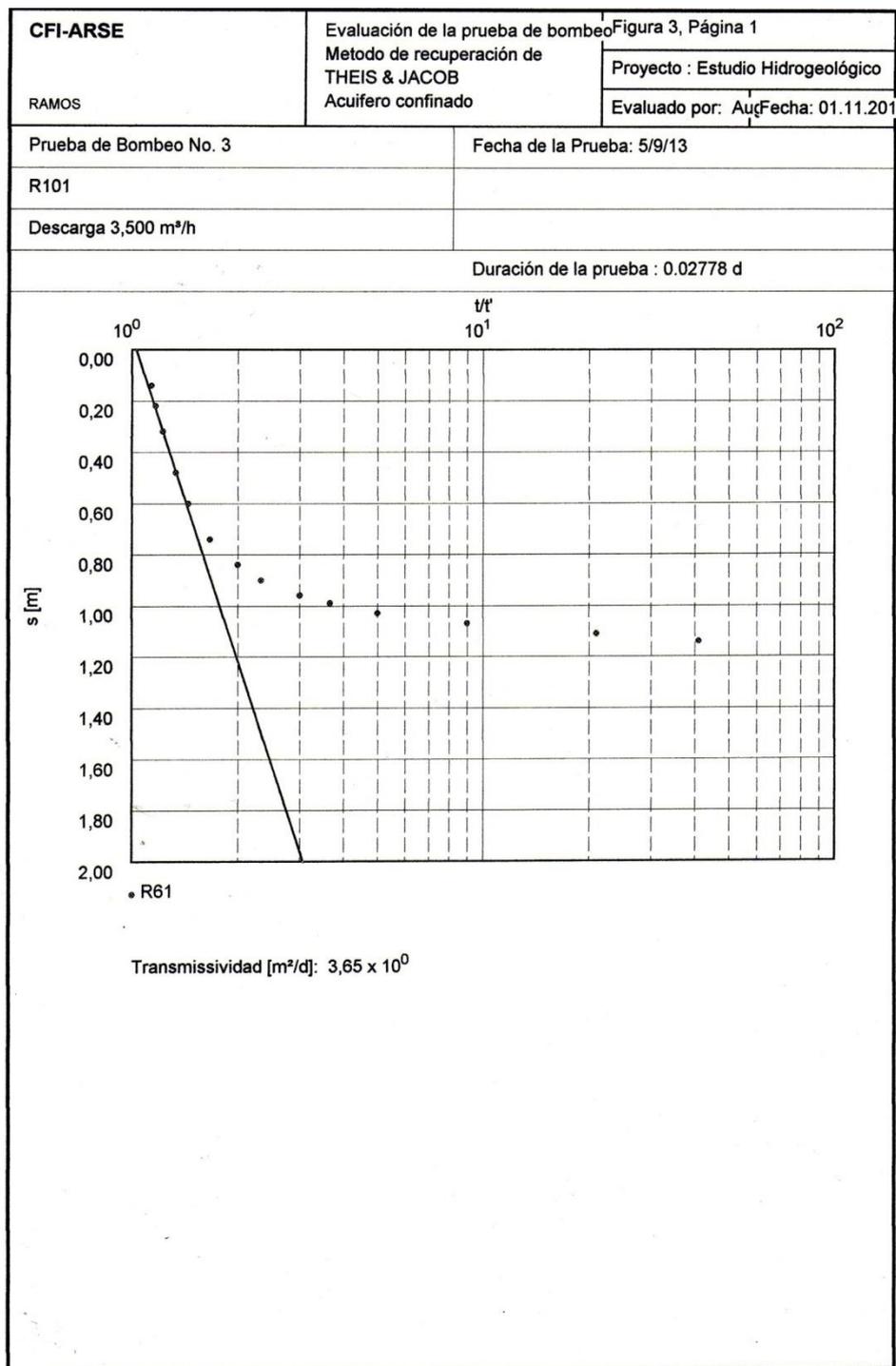
**Ensayo 3.** Se realizó en el pozo R101, de 6,3 m de profundidad y 1,3 m de diámetro, con 1,47 m de columna de agua, con 1,95 m<sup>3</sup> de volumen almacenado, terminado en sedimentos aluviales arenosos del Cañadón Cuyún Leufú. El bombeo insumió 40' a un caudal de 3,5 m<sup>3</sup>/h, tiempo al cabo del cual sólo quedaban 28 cm de agua dentro del pozo, producto de una depresión de 1,19 m. La recuperación se midió durante 300', faltando recuperar aún 14 cm para alcanzar el nivel estático (4,83 m). Tomando la tendencia de la recuperación de los últimos 60' (8 cm), el tiempo restante para alcanzar el nivel estático sería de 168', que agregados a los 300' anteriores, resulta en 468' totales (7,8 hs.). El ejemplo indica una afluencia mucho mayor que la obtenida en los ensayos 1 y 2, derivada de una productividad también mayor del acuífero asociado a sedimentos aluviales, respecto a los contenidos en rocas. Algo similar sucede en los ensayos realizados en Valcheta.

En la planilla Pozo de Bombeo R101, obrante en el Anexo II, se indican las características geométricas del pozo y los registros efectuados en el mismo.

En la Figura 3 se vuelcan las depresiones residuales ( $s'$ ) versus  $t/t'$  y en la misma se aprecia un regular alineamiento de puntos entre 9 y 240' de iniciada la







recuperación; la recta resultante de la unión de dichos puntos deriva en una transmisividad  $T = 3,6 \text{ m}^2/\text{d}$ , que en principio, y pese a las limitaciones señaladas anteriormente respecto a la geometría de los pozos y a la escasa permeabilidad del medio, aparece como relativamente representativa del acuífero ensayado, que es del tipo libre y de forma lenticular.

El encabezado de las figuras 1, 2 y 3 hace referencia al método de Theis & Jacob y señala que es para acuífero confinado, sin embargo el software Aquitest 2.0 dispone de la ecuación de Jacob para corregir el efecto de disminución del espesor saturado por el bombeo en un acuífero libre, por lo que también puede aplicarse a este último.

## 11. INTERPRETACIÓN CARTOGRÁFICA

En el **Mapa 4** se compara la red de flujo subterráneo con la topografía, apreciándose una coincidencia general entre la pendiente topográfica y el sentido del flujo subterráneo, que tiene una orientación dominante SO-NE. La descarga subterránea regional se da en las Salinas de Trapalcó, integrantes del Bajo de Menucos, ubicadas al NE, por fuera del área estudiada. El principal ámbito de recarga coincide con la Sierra Queupuniyeu, con un gradiente hidráulico medio, entre el pie de la misma (equipotencial 850 m) y el sector NE (equipotencial 300 m), de  $7,5 \times 10^{-3}$  (7,5 m/km), siguiendo la traza del filete de flujo F1, que resulta prácticamente igual al topográfico (7,4 m/km). El filete F4 indica una desviación del flujo subterráneo hacia el SE, como consecuencia de un ámbito de descarga local. Otra desviación respecto al flujo regional se observa en el filete F5, que se orienta hacia el NNE. El filete F3, apunta hacia el gran Bajo Cabeza de Potro, ubicado fuera del área estudiada. La máxima profundidad del nivel freático registrada en el ámbito estudiado fue de 33,40 m (R26), la mínima de 1,75 m (R97) y el promedio de 7,4 m, lo que indica la existencia de recarga local, pese a un marcado déficit en la precipitación que abarcó el lapso 2006-2012.

En el **Mapa 5**, se compara al flujo subterráneo con el componente geológico. En los sectores donde afloran las rocas cristalinas, tanto las líneas equipotenciales como las de flujo se trazaron en forma cortada, debido al comportamiento discontinuo del medio. Sólo al atravesar sedimentos y sedimentitas las líneas se trazaron en forma continua. El control que ejerce el medio discontinuo sobre el flujo y la falta de ensayos hidráulicos representativos que permitan determinar la magnitud de la permeabilidad, inhiben el cálculo para estimar la velocidad con que se mueve el agua subterránea.

En el **Mapa 6** se vuelcan los valores de salinidad total (ST) o sólidos disueltos totales (SDT) sobre la base del Topográfico con la red de flujo, observándose que si

bien se dan bajas concentraciones hacia la zona de recarga principal (Sa. Queupuniyeu) (R86, R88, R89, R90), ello también sucede en sitios alejados de la misma, siguiendo el sentido del flujo (R73, R76, R77, R78). Esta aparente contradicción entre salinidad y recorrido, se debe a que los pozos citados, como otros que también registraron bajas salinidades totales, se ubican en bajos que permiten la concentración del escurrimiento superficial y la infiltración de agua dulce y se corresponden con el acuífero freático somero, mencionado en el capítulo 8. Las mayores salinidades, superiores a 10.000 mg/L (R17-Perf. R19, R21, R22, R29-Jag, R29-Perf y R31) se dan en perforaciones terminadas en el acuífero subyacente al freático y/o en pozos cavados, en ambos casos alejados del ámbito de recarga principal.

La salinidad total más baja fue de 434 mg/L (R75), la más alta de 22.350 mg/L (R29-Perf.) y el promedio de 3.234 mg/L, valores todos notoriamente más bajos que los obtenidos en Valcheta.

El **Mapa 7** tiene los valores de SDT sobre la base del Mapa 3 (Geológico-Hidrogeológico), con la red de flujo. Al respecto se mencionó en el capítulo 7 que:

A los **Sedimentos continentales**, se los aprovecha para la captación de agua mediante pozos cavados de poca profundidad, en la vecindad de los cauces de cañadones como el Cullen Leufú (pozos R95, R96, R79, R80, R101) donde registran salinidades totales (ST) menores a 2.500 mg/L, aunque también se da que superen los 4.000 mg/L (R68, R69, R99, R100). Los **Basaltos**, debido a su profusa estructura alveolar, poseen un trascendente interés hidrogeológico, pues constituyen vías preferenciales para la recarga subterránea, pero dado que no se censó ningún pozo en basalto, no se puede establecer con certeza su comportamiento hidroquímico; sin embargo, es previsible que el agua subterránea asociada tenga baja salinidad, especialmente en la Sierra Queupuniyeu, pues la misma constituye el principal ámbito de recarga de la zona estudiada. Sólo 2 pozos fueron muestreados en las **Sedimentitas continentales** (R97 y R3) y dieron SDT elevados (6.820 y 3.816 mg/L). La mayoría de los pozos censados están comprendidos en las **Vulcanitas** y de su muestreo se desprende que el agua asociada tiene SDT **bajos** (menores a 1.000 mg/L) (R7, R8, R36, R37), **medios** (entre 2.000 y 2.500 mg/L) (R12, R13, R57) y **altos** (mayores a 6.000 mg/L) (R64) y **muy altos** (mayores a 14.000 mg/L) (R19, R21 y R22). Existen varios pozos que cumplen con algunas de las

condiciones, respecto a la salinidad total citadas previamente, y que en el Mapa 7 aparecen dentro del ámbito de Vulcanitas, pero que en las fichas de censo se corresponden con depósitos aluviales, por lo que no fueron incluidos en la clasificación. Esta aparente contradicción, se debe a la escala empleada en el mapa (1:280.000), que no permite diferenciar formas menores a 280 m de extensión. El agua subterránea asociada a los **Granitos** presenta salinidades totales: **bajas** (pozos R90, R92), **medias** (R66, R72, R91) y **altas** (R18, R19).

En el **Mapa 8** se representan los lineamientos estructurales, producto de eventos tectónicos de distinta edad (Gebhard et al, 2013), apreciándose una orientación dominante ONO-ESE y otra subordinada NE-SO, obtenidas a partir de la cantidad de lineamientos registrados en la imagen satelital, especialmente sobre el afloramiento granítico vecino a la Ea. Fernández (diagrama number of lineaments). Esta región manifiesta un intenso diaclasamiento que la hace interesante como un reservorio potencial de agua subterránea en roca.

En campaña se efectuaron 59 mediciones de rumbo y buzamiento de diaclasas, en 29 afloramientos (15 en vulcanitas, 11 en granitos y 3 en sedimentitas). En el Mapa 3 se representan las estructuras mencionadas pero, con el objeto de evitar el empastamiento, en aquellos sitios donde se midió más de 1 sistema, la representación sólo muestra la ubicación del sistema de diaclasas que cubre la gama más amplia en referencia al índice estructural, debido a que resulta el más interesante hidrogeológicamente.

En las **Vulcanitas** predomina el rumbo NO-SE, entre 280 y 345° (55% de los registros), seguido del rumbo NE-SO, entre 10 y 60° (32%) y finalmente el rumbo quasi E-O (13%). En todos los casos el buzamiento netamente dominante es el subvertical, con más de 80°.

En los **Granitos** sigue dominando el rumbo NO-SE, entre 290 y 350° (44%), aunque con menor diferencia respecto al rumbo NE-SO, entre 20 y 70° (40%), mientras que la dirección E-O registró un 15% del total de las mediciones. También predomina el buzamiento subvertical, aunque es más frecuente la existencia de inclinaciones entre 8 y 50° al SE, NO y NE.

En definitiva, los sistemas de diaclasas dominantes de rumbo NO-SE, no controlan la orientación de los cauces ni la pendiente topográfica regional, que se

disponen SO-NE, aparentemente regidos por una tectónica más profunda, caracterizada por fallas transcurrentes (Ramos y Cortés, 1984)

Las **Sedimentitas continentales**, al disponerse en una posición horizontal-subhorizontal, carecen de rumbo.

## 12. HIDROQUÍMICA

El tipo y concentración de las sustancias disueltas constituyen uno de los factores principales que inciden en la calidad del agua subterránea, otro es el componente biológico integrado por bacterias y virus. La hidroquímica subterránea, además, es una herramienta importante para dilucidar el origen de los iones en solución y suele resultar de utilidad para entender la dinámica del agua subterránea.

### 12.1. Clasificación

Como ya se señaló, los análisis químicos de las muestras de agua tomadas durante el censo hidrogeológico, se realizaron en el laboratorio Funbapa (Fundación Barrera Patagónica) y sus resultados se sintetizan en la Tabla 5 - Anexo IV. De la misma se desprende que los **sólidos disueltos totales** (SDT) registraron extremos de 434 mg/L (R75) y 22.350 mg/L (R29-Perf.), con un promedio de 3.234 mg/L.

Considerando una de las clasificaciones más empleadas, que asume como dominante al ión cuya concentración supera al 50% de la total, dentro de los aniones hay un reparto CASI equivalente entre **sulfatos** (25%) y **cloruros** (24%) del total de las muestras analizadas (93); siguen los **bicarbonatos** con el 13% y, sin predominio individual, o sea con participación de los 3 aniones pero con menos del 50% cada uno, el 37%. Respecto a las concentraciones, los **Cl<sup>-</sup>** midieron un máximo de 263,1 meq/L (9.340 mg/L) en R29-Perf., un mínimo de 0,9 me/l (32 mg/L) en R34 y un promedio de 26,2 meq/L (930 mg/L). Los **SO<sub>4</sub><sup>=</sup>** registraron extremos de 94,9 meq/L (4.555 mg/L) en R47 y 0 meq/L en R89, con un promedio de 19 meq/L (912 mg/L). Los **CO<sub>3</sub>H<sup>-</sup>** registraron un máximo de 44,6 meq/L (2.721 mg/L) en R83, un mínimo de 0,9 meq/L (55 mg/L) en R62 y un promedio de 5,7 meq/L (348 mg/L).

En relación a los cationes el predominio del **Sodio**, con concentraciones mayores al 50% de las totales, es notable con 92% de las muestras analizadas y sólo el 8% restante son cálcicas y magnésicas, pero sin predominio individual. El **Na<sup>+</sup>** brindó extremos de 553,2 meq/L (12.724 mg/L) en R29-Perf. y 2,8 meq/L (64

mg/L) en R64, con un promedio de 43,7 meq/L (1005 mg/L), que es casi igual a la suma de  $\text{Cl}^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ .

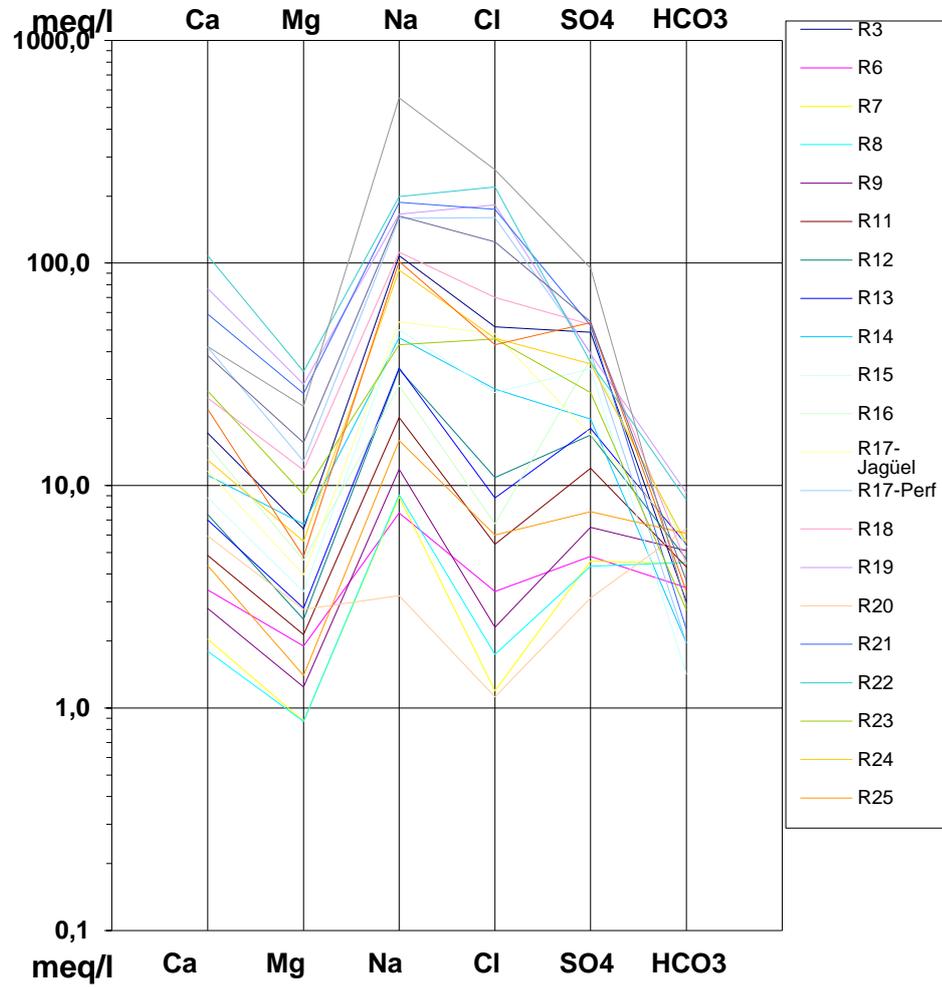
Respecto a la combinación aniónica-catiónica, domina ampliamente la correspondiente a **cloruradas y sulfatadas sódicas** (sector derecho del rombo de Piper), con el 85% de las muestras analizadas, mientras que el 10% son **bicarbonatadas sódicas** y el 5% restante son **bicarbonatadas cálcicas y/o magnésicas**.

Hasta unos 10 g/L de salinidad total, se reparten el dominio iónico cloruros y sulfatos, pero pasando los 10 g/L todas las muestras son netamente cloruradas y recién por debajo de 1 g/L domina el bicarbonato.

En las figuras 4a-4d y 5a-5d se representan gráficamente, mediante los diagramas de Schoeller y Piper, las composiciones químicas de las muestras analizadas, cuya repetición en 4 gráficos por cada método, se debe a que el programa empleado sólo admite el procesamiento de 24 muestras por vez.

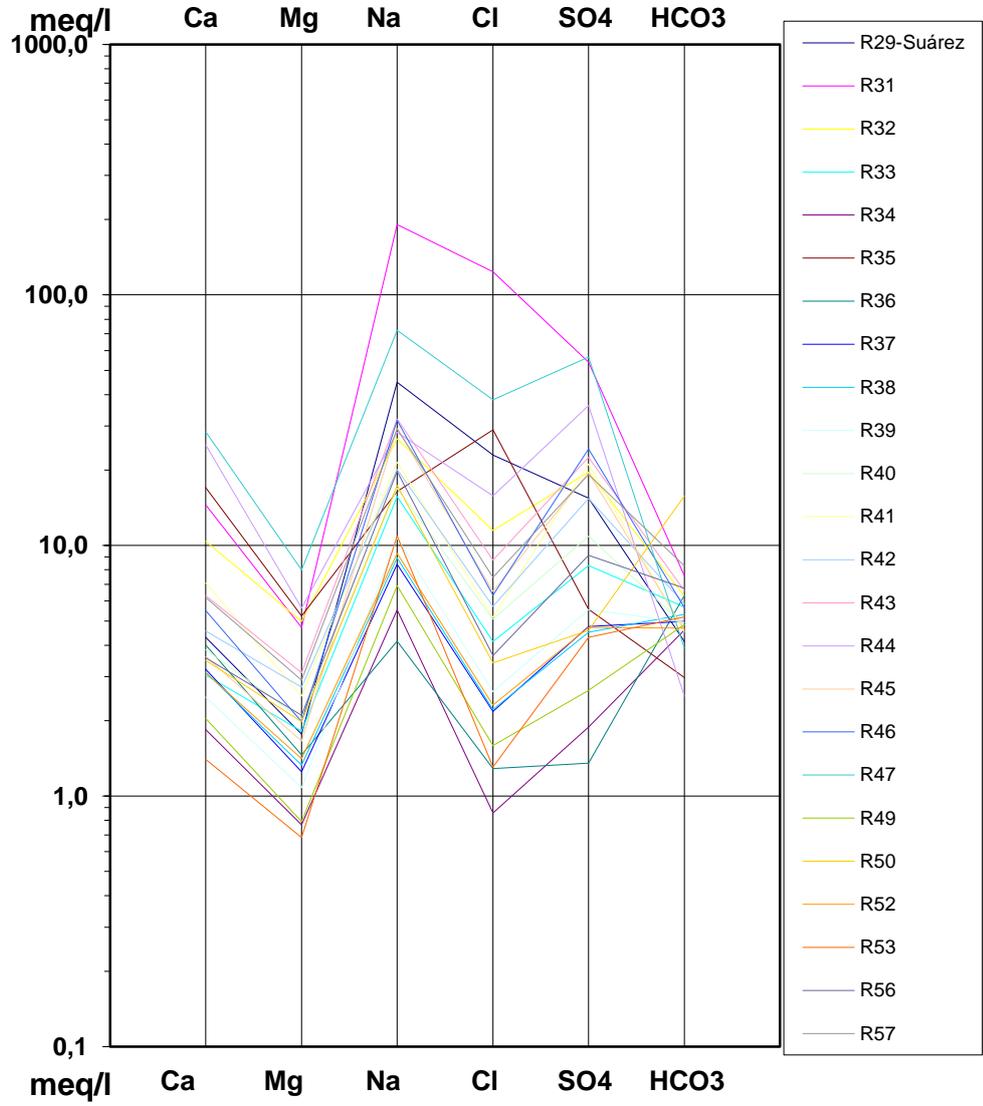
RAMOS

Figura 4a



RAMOS

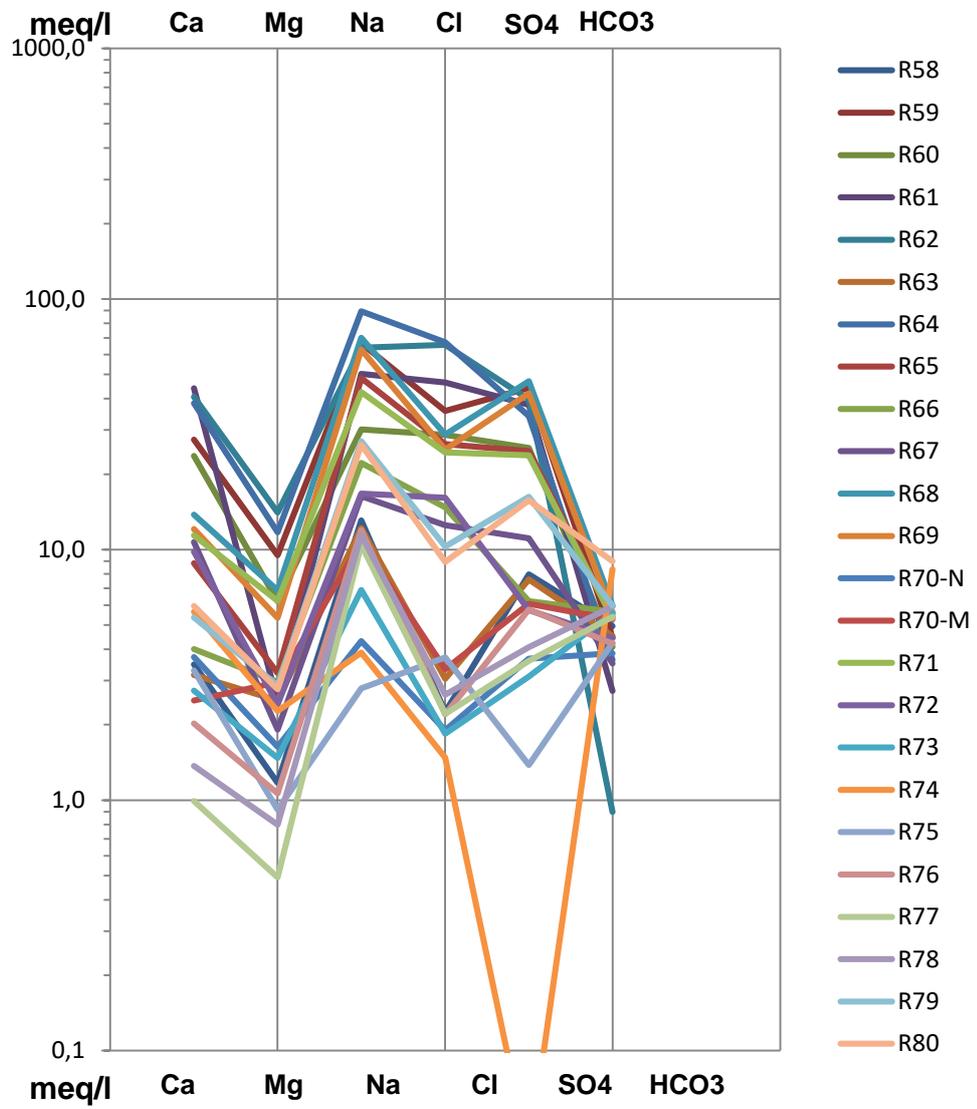
Figura 4b



SCHOELLER-BERKALOFF

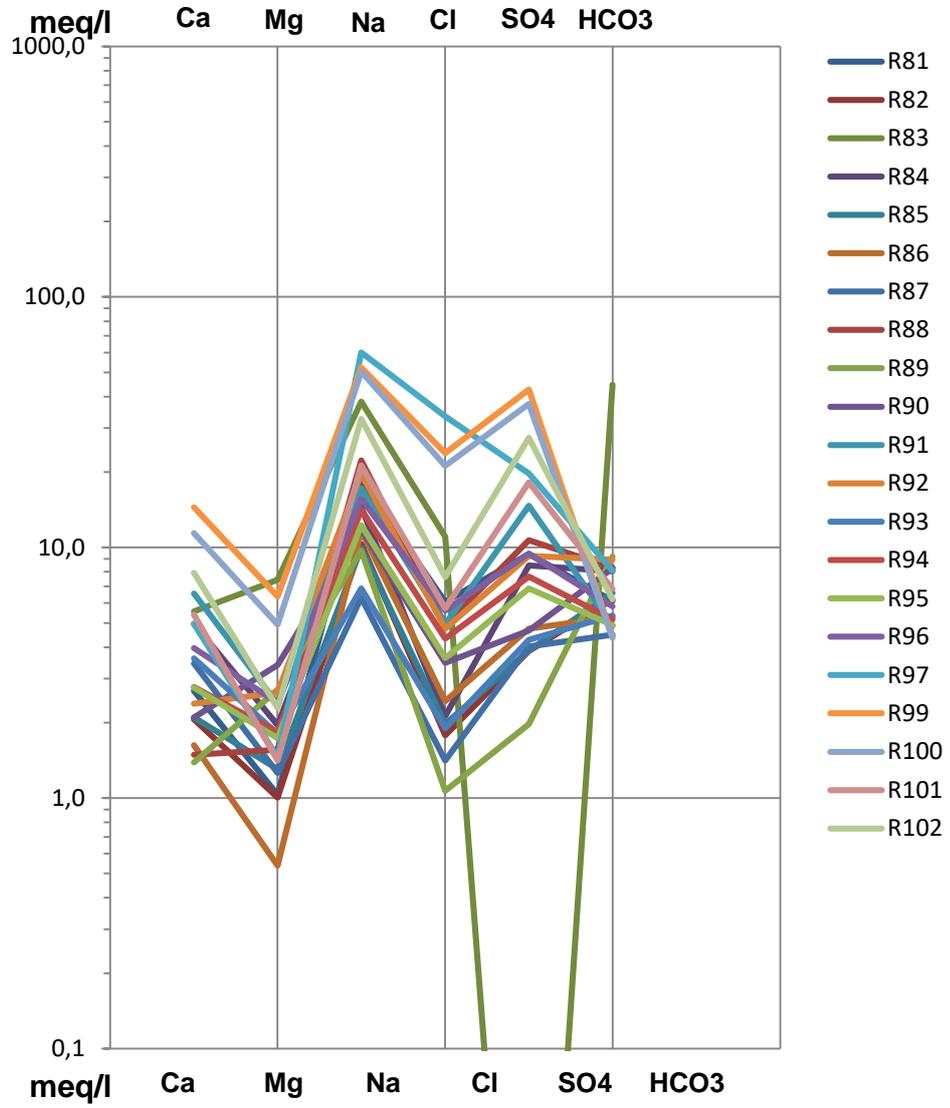
RAMOS

Figura 4c



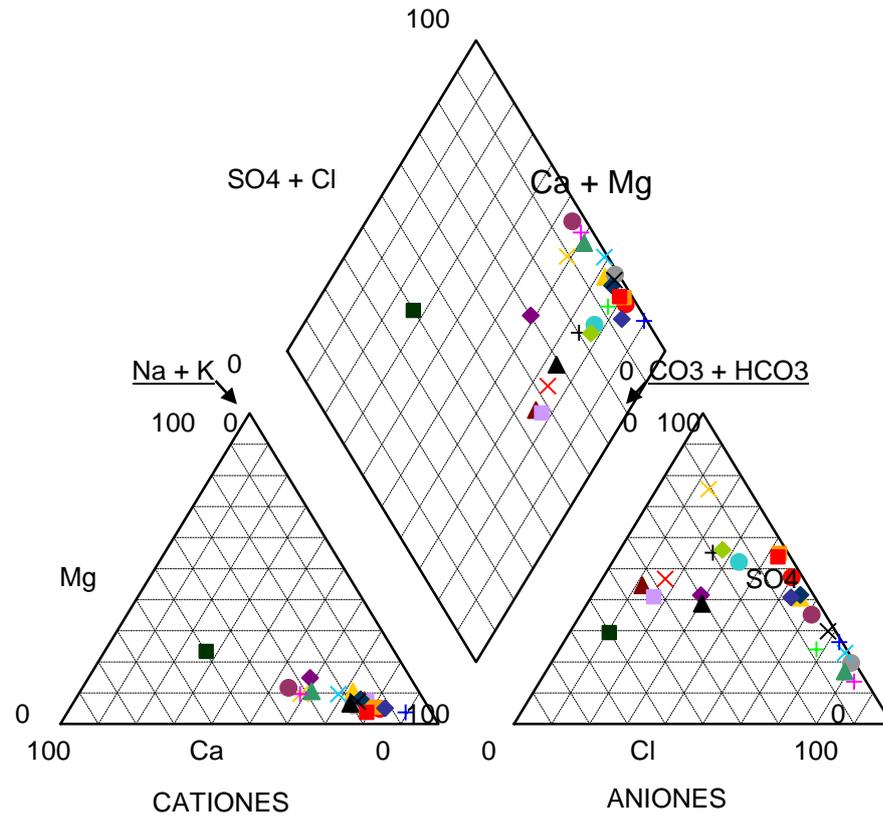
RAMOS

Figura 4d



PIPER

Figura 5a

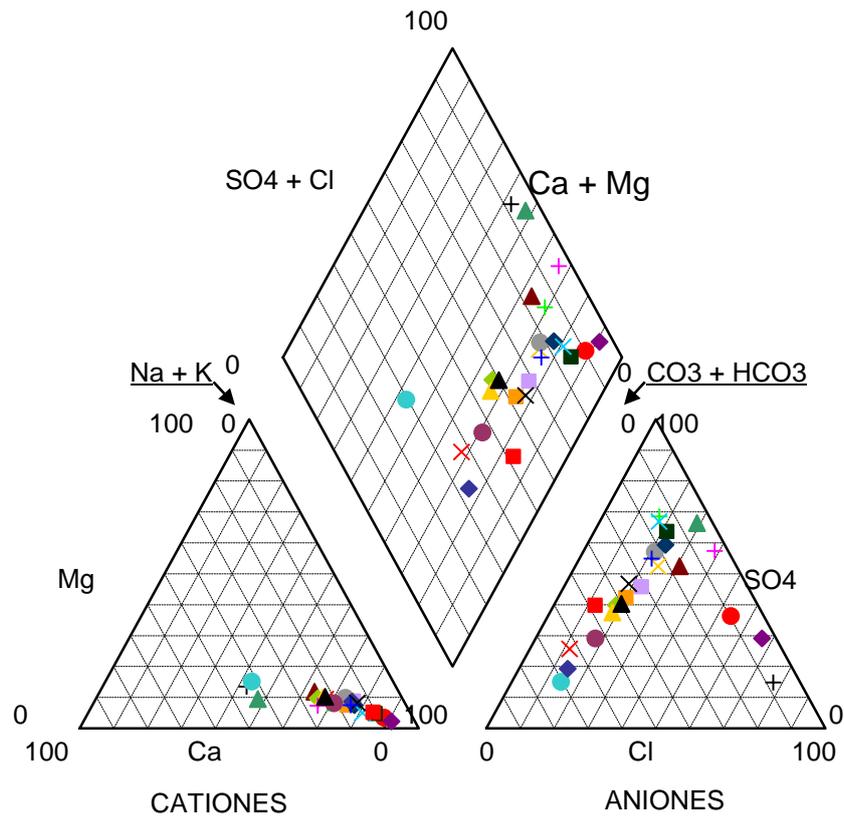


● R3	◆ R6	▲ R7	■ R8	× R9
+ R11	● R12	◆ R13	▲ R14	■ R15
× R16	+ R17-Jagüel	● R17-Perf	◆ R18	▲ R19
■ R20	× R21	+ R22	● R23	◆ R24
▲ R25	■ R27	× R29-Jagüel	+ R29-Perf	

PIPER

RAMOS

Figura 5b

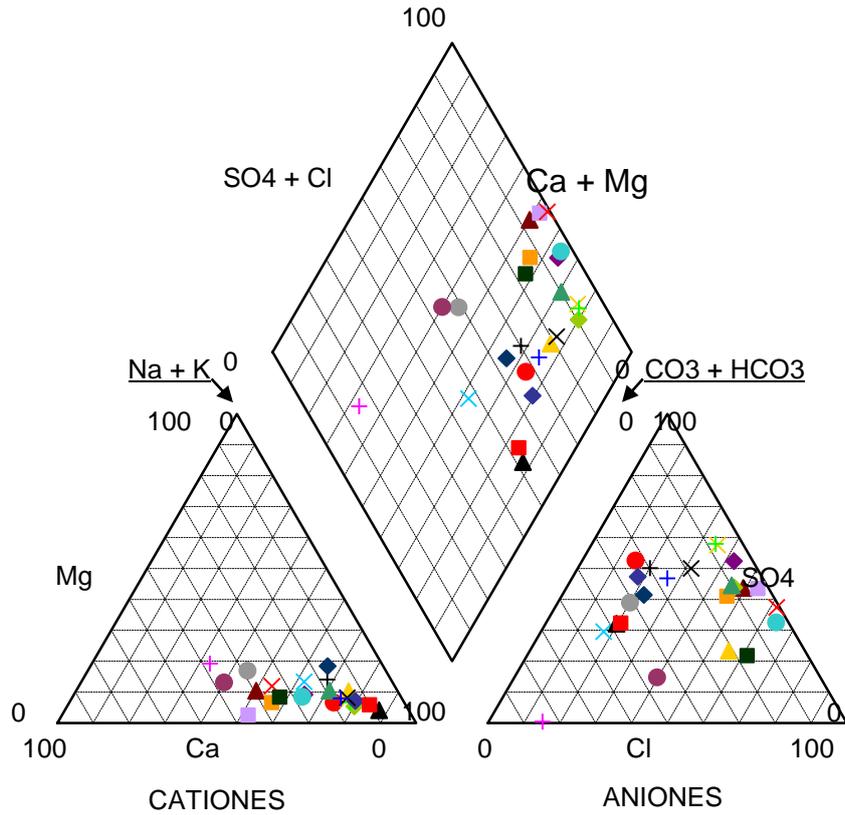


● R29-Suárez	◆ R31	▲ R32	■ R33	× R34
+ R35	● R36	◆ R37	▲ R38	■ R39
× R40	+ R41	● R42	◆ R43	▲ R44
■ R45	× R46	+ R47	● R49	◆ R50
▲ R52	■ R53	× R56	+ R57	

PIPER

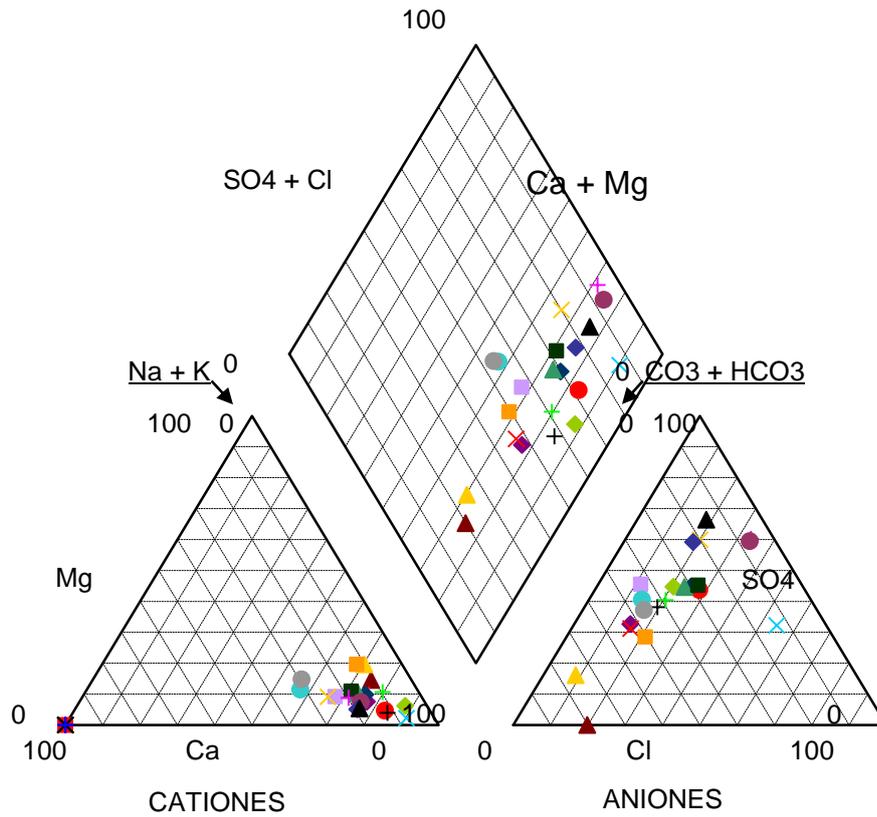
RAMOS

Figura 5c



● R58	◆ R59	▲ R60	■ R61	× R62	+ R63	● R64	◆ R65
▲ R66	■ R67	× R68	+ R69	● R70-N	◆ R70-M	▲ R71	■ R72
× R73	+ R74	● R75	◆ R76	▲ R77	■ R78	× R79	+ R80

**RAMOS** **PIPER**  
**Figura 5d**



● R81	◆ R82	▲ R83	■ R84	× R85	+ R86	● R87
◆ R88	▲ R89	■ R90	× R91	+ R92	● R93	◆ R94
▲ R95	■ R96	× R97	+ R99	● R100	◆ R101	▲ R102

En el Mapa 9 se representan los contenidos iónicos mediante el método de Stiff, sobre la base del mapa con el flujo subterráneo y en el mismo no se observa buena correspondencia entre el aumento en el tamaño de los diagramas, que implica aumento en el contenido salino y el sentido del flujo subterráneo; sólo en forma difusa, dicha relación se aprecia entre los filetes de flujo F2 y F3 y a lo largo de este último. La falta de correspondencia flujo - salinidad, se debe a que en el muestreo se incluyó, sin diferenciarlos, al acuífero somero y al profundo descritos en el capítulo 8.

## 12.2. Aptitud

La aptitud del agua depende de sus componentes físicos, químicos y biológicos y del uso previsto para la misma.

Como componentes físicos más comunes se pueden señalar a la temperatura, la turbiedad, la conductividad eléctrica, el color, el olor y el sabor. Dentro de los químicos se destacan los aniones y cationes más comunes ( $\text{CO}_3\text{H}^-$ ,  $\text{Cl}^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{++}$  y  $\text{Mg}^{++}$ ), y otras sustancias disueltas en proporciones menores como los nitratos y fluoruros, los metales (Fe, Mn, Se, Pb, V, Al, Cd), los metaloides (As) y algunos componentes producto de la contaminación artificial, como los hidrocarburos, o los derivados de plaguicidas. Dentro de los componentes biológicos se pueden citar a las bacterias (coliformes, *Escherichia coli*, *Pseudomona aeruginosa*) y a los virus (Adenovirus y los virus de la hepatitis A y E).

Respecto al uso previsto para el agua, las normas más frecuentes están referidas al consumo humano (potabilidad), al riego, al uso ganadero y al industrial; otros menos frecuentes son recreación y limpieza.

**Potabilidad.** Las normas sobre potabilidad han ido evolucionando hacia límites más estrictos a través del tiempo, tanto en lo referente a aquellos componentes que pueden generar trastornos secundarios, menores, o transitorios en la salud (aniones y cationes más comunes), como a otros peligrosos, que pueden producir enfermedades de diferente gravedad (As,  $\text{F}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ , Pb, Se, Cd). Sin embargo, los umbrales de potabilidad para la mayoría de los componentes peligrosos no están fundamentados en investigaciones toxicológicas basadas en una cantidad representativa de habitantes y a lo largo de un lapso de tiempo que también resulte representativo. Esto sucede en nuestro país, pero también en países

desarrollados y aún en organizaciones de reconocido prestigio internacional como la Organización Mundial de la Salud (OMS). Un ejemplo es el límite de potabilidad asignado al As, al que el Código Alimentario Argentino (CAA), le fija un límite de 0,01 mg/L, pero que actualmente está en revisión. Dicho valor surgió copiando las normas de la EPA (Environmental Protection Agency), de la Comunidad Europea (CE) y de la OMS, pese a que la OMS (2008) aclara que el valor de referencia de 0,01 mg/L para el As es **“provisional, por haber evidencia de peligro, aunque la información disponible sobre efectos en la salud es limitada”** (Auge, et al 2013).

Esta circunstancia y la calidad del agua subterránea disponible en diferentes regiones, hicieron que las normas de potabilidad difieran significativamente aún en provincias limítrofes. Al respecto, continuando con el As, las provincias de Buenos Aires, Córdoba y Río Negro le fijan un límite máximo de 0,05 mg/L, La Pampa 0,15, Santa Fe 0,1, y Entre Ríos 0,01 mg/L, pese a que en ningún caso existen estudios toxicológicos representativos. Las diferencias en las normativas también se dan cuando se trata de los componentes comunes disueltos en el agua.

**En virtud de lo expuesto, y dado que la Provincia de Río Negro adopta las normas del COFES (Consejo Federal de Entidades de Servicios Sanitarios), en este estudio se seguirá lo establecido en las mismas para el agua de consumo humano, mientras que para el ganado se emplearán las obrantes en el trabajo de Cerana (1972).**

En la Tabla 6 se indican los límites para la potabilidad adoptados por la Provincia de Río Negro, en la que se diferencian 2 tipos de componentes; los que **afectan a la salud** y los que afectan la **aceptabilidad del agua**.

De las sustancias que afectan la salud, se hicieron determinaciones de laboratorio sobre **Flúor, Arsénico y nitratos**. El límite adoptado por la norma para el **Flúor** es **1,5 mg/L**, pero en la misma se aclara que: “al fijar el límite tolerable se deben tener en cuenta las condiciones climáticas regionales, el volumen de agua consumido, y la ingestión a partir de otras fuentes”.

En la Tabla 7 (Anexo V) se vuelcan los contenidos de F, As y NO<sub>3</sub>, diferenciando aquellos que cumplen con la norma de potabilidad (azul) de los que no lo hacen (rojo).

Se hicieron 57 determinaciones sobre As de las cuales 7 muestras (12% del total) dieron valores mayores al admitido por la norma COFES (50 µg/L) (R16 - 59

µg/L, R25 – 122, R66 – 214, R67 – 107, R77 – 118, R78 – 112, R82 – 82 µg/L), con un promedio 38,5 µg/L, un máximo de 214 µg/L (R66) y un mínimo < 10 µg/L (9 muestras).

Por F se analizaron 65 muestras y sólo 1 dio un contenido menor al límite de 1,5 mg/L (R20 – 0,8 mg/L); el promedio fue de 5,1 mg/L, el máximo 8,3 (R86) y el mínimo 0,8 mg/L (R20), **por lo que el Flúor constituye el principal limitante de la potabilidad en el ámbito estudiado.**

Los nitratos registraron sólo 5 muestras (9% del total) con tenores mayores al límite de 50 mg/L (R17 – 60 mg/L, R14 - 56, R20 – 87, R29 Suárez – 54, R81 - 215 mg/L), por lo que no actúan como un limitante determinante de la potabilidad.

<b>NORMAS COFES</b>			<b>TABLA 6</b>
<b>Componentes que Afectan la Salud</b>			
Componente inorgánico	Límite Tolerable	Unidad	Observaciones
Arsénico	<b>0,05</b> (P) (1) (2) (3)	mg/L	
Flúor	<b>1,5</b> (3)	mg/L	Al fijar el límite tolerable se deben tener en cuenta las condiciones climáticas regionales, el volumen de agua consumido y la ingestión a partir de otras fuentes.
Nitrato	<b>50</b>	mg/L	Como NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
<p><b>(P)</b> Límite Provisorio. Este término se utiliza para aquellos componentes para los cuales existe alguna evidencia de algún peligro potencial pero la información disponible sobre los efectos sobre la salud es limitada: o cuando el factor de incertidumbre utilizado al establecer la Ingesta Diaria Tolerable (IDT) es superior a 1.000.</p> <p><b>(2)</b> Para las sustancias consideradas cancerígenas, el límite tolerable es la concentración en agua potable asociada con un exceso de riesgo de contraer cáncer al cabo de la vida, de 10<sup>-5</sup> (1 caso de cáncer adicional por 100.000 habitantes que consumen agua potable conteniendo la sustancia a una concentración igual al valor durante 70 años).</p> <p><b>(3)</b> Las excepciones en la aplicación de este límite dependerán de la recomendación de las autoridades sanitarias.</p>			
<b>Componentes o Características que Afectan la Aceptabilidad del Agua por parte del Consumidor</b>			
Componente inorgánico	Límite Tolerable (1)	Unidad	Observaciones
Cloruro	<b>250</b>	mg/L	
pH	<b>6,5-8,5</b> (3)	Unidades pH	Para una efectiva desinfección con cloro el pH debe ser < 8,5
Sodio	<b>200</b>	mg/L	
Sulfato	<b>250</b>	mg/L	
Sólidos Disueltos Totales (4)	<b>1.500</b>	mg/L	
<p><b>(1)</b> Las concentraciones indicadas no son números precisos. Pueden surgir reclamos a menores o mayores concentraciones dependiendo de circunstancias locales.</p> <p><b>(3)</b> Se admitirán pH superiores al establecido cuando el pH de saturación &gt; 8,5.</p>			

(4) Puede ser expresado como Residuo Seco a 105 °C.

En definitiva, debido a que la única muestra que resultó potable en relación al F (R20), no lo fue respecto a los NO<sub>3</sub>, porque registró un contenido de 87 mg/L, **ninguna de las 65 muestras analizadas resultó potable al considerar todos los componentes peligrosos para la salud.**

Considerando los componentes que afectan la **aceptabilidad** del agua, se tiene respecto a la potabilidad (Tabla 7 – Anexo V) que:

- Los **cloruros** registraron un máximo de 2.392 mg/L (R62), un mínimo de 30 mg/L (R34) y un promedio de 246 mg/L. De las 66 muestras analizadas, 17 (26% del total) dieron valores superiores al límite establecido por la norma COFES (250 mg/L).
- El **pH** registró un máximo de 9,0 (unidades de pH), un mínimo de 6,7 y un promedio de 8,3 un. pH. Sólo el 14% de las muestras analizadas (9/66) dieron valores superiores a 8,5, que es el límite superior de potabilidad para el pH); ninguna muestra registró menos de 6,5 (límite inferior de potabilidad).
- El **Sodio** dio un máximo de 1.470 mg/L (R62), un mínimo de 64 mg/L (R75) y un promedio de 414 mg/L, con 54 muestras (82% del total) por encima del límite adoptado para la potabilidad (200 mg/L).
- Los **sulfatos** registraron un máximo de 1.905 mg/L (R62), un mínimo de 0 mg/L (R83) y un promedio de 483 mg/L, con 40 muestras (61% del total) por encima del límite de potabilidad (250 mg/L).
- Los **sólidos disueltos totales** dieron un máximo de 6.700 mg/L (R62), un mínimo de 434 mg/L y un promedio de 1.493 mg/L, con 26 muestras (39% del total) por encima del límite de potabilidad (1.500 mg/L).

De lo expuesto se desprende que el mayor limitante para la potabilidad, dentro de los componentes que afectan la aceptabilidad del agua, es el Sodio (82% de las muestras analizadas superan el límite de potabilidad), seguido por los sulfatos (61%), los sólidos disueltos totales (39%), los cloruros (26%) y el pH (14%).

En el Mapa 10 se representa a la potabilidad en función de los componentes que le otorgan **aceptabilidad** al agua.

Para el **ganado** existen diversas clasificaciones en relación a la aptitud del agua para su alimentación. Las necesidades de ciertos componentes químicos y la

resistencia frente a otros, también varía de acuerdo a la especie y raza del animal. En términos generales se puede indicar que los herbívoros (vacunos, equinos, bovinos), tienen mayor necesidad de sales que los cerdos y las aves, y que los carnívoros, las incorporan en cantidad suficiente de la carne con que se alimentan.

Para nuestro país, basado en límites tomados de Australia, Cerana (1972) menciona los máximos indicados en la Tabla 8, respecto a la salinidad total.

<b>TABLA 8</b>	
<b>APTITUD DEL AGUA PARA EL GANADO</b>	
	<b>Salinidad total (mg/L)</b>
<b>Ovinos adultos</b>	<b>12.000</b>
<b>Bovinos para faena</b>	<b>10.000</b>
<b>Bovinos lecheros</b>	<b>7.200</b>
<b>Equinos</b>	<b>6.500</b>
<b>Cerdos</b>	<b>3.000</b>

Considerando dichos valores, se tiene que las 66 muestras analizadas resultaron aptas para el consumo de los **ovinos adultos**, de los **bovinos para carne** y de los **bovinos lecheros**, dado que el límite de aptitud para la salinidad total es de 12, 10 y 7,2 g/L respectivamente y el máximo registrado fue de 6,7 g/L (R62). Para los **equinos** sólo es **inapta** la muestra R62 y para los **porcinos** resultaron inaptas las muestras R14, R16, R62, R71, R83 (Tabla 9 - Anexo VI); o sea el 8% del total. De lo expuesto se desprende que el agua subterránea del Área Ramos resulta apta para el consumo del ganado, aunque en algunos casos los bebederos para su abrevamiento son muy rudimentarios (Foto 5).



Foto 5. Bebedero rudimentario para el ganado. Ubicación R87.

Para el **riego**, tanto **intensivo como extensivo**, las condiciones del agua subterránea no son favorables en lo referente a calidad, y fundamentalmente a disponibilidad y a productividad. Al respecto sólo puede preverse su aplicación de la forma en que se lo practica actualmente; o sea riego muy puntual de plantas domésticas.

### 13. CONCLUSIONES y RECOMENDACIONES

- El conjunto de **rocas cristalinas (Vulcanitas y Granitos)**, **Sedimentitas continentales y Basaltos** ocupa el 67% del ámbito estudiado, mientras a que los **Sedimentos continentales** le corresponde el 33% restante. Las rocas cristalinas en general, generan un medio discontinuo, en el que el agua sólo se presenta en las superficies de debilidad (diaclasas, fallas), mientras que el resto del cuerpo de la roca, debido a la cristalización masiva, es prácticamente impermeable. Debido a ello, en este medio, se dificulta la prospección, tanto mediante el empleo de técnicas geofísicas como de perforaciones. Los **sedimentos** pueden almacenar y transmitir agua a través de los poros existentes entre los granos, generando un medio hidráulico continuo. Las **sedimentitas**, o rocas sedimentarias, suelen conformar un medio que combina los dos 2 anteriores; o sea, pueden almacenar agua en

superficies de debilidad, pero también por fuera de dichas superficies, cuando el cuerpo de roca tiene espacios porales, aunque estos en general, se presentan en una proporción mucho menor que en los sedimentos. Los **basaltos** del Neógeno, merecen un tratamiento especial, pues si bien están dentro de la categoría de rocas por su grado de litificación, debido a su estructura alveolar, tienen un significativo interés hidrogeológico, pues constituyen vías preferenciales para la recarga subterránea.

- Los sistemas de diaclasas más frecuentes en las rocas graníticas y riolíticas, que se orientan NO-SE, **no controlan la orientación de los cauces ni la pendiente topográfica regional**, que se disponen SO-NE, aparentemente regidos por una tectónica más profunda caracterizada por fallas transcurrentes. Existe un intenso diaclasamiento en el afloramiento granítico vecino a la Estancia Fernández que, preliminarmente, lo hace interesante como un reservorio potencial de agua subterránea en roca.
- Del balance hídrico a nivel edáfico surge una marcada deficiencia de agua al comparar la **evapotranspiración real (Etr)** que fue de 330 mm/a, respecto a la precipitación (225 mm/a), lo que deriva en un déficit de 105 mm/a. Este déficit, sin embargo, no se condice con la existencia de agua subterránea a poca profundidad, en la gran mayoría de los pozos censados, con un promedio de 7,4 m, aún después de que en los 7 últimos años dominó un marcado déficit en las precipitaciones. Lo antedicho es uno de los indicadores de la existencia de **recarga subterránea**.
- El flujo subterráneo regional tiene una orientación dominante SO-NE, en coincidencia con la pendiente topográfica. El principal ámbito de recarga coincide con la Sierra Queupuniyeu, con un gradiente hidráulico medio, entre el pie de la misma y el extremo NE de  $7,5 \times 10^{-3}$  (7,5 m/km), que resulta prácticamente igual al topográfico (7,4 m/km). La descarga subterránea regional se da en las Salinas de Trapalcó, integrantes del Bajo de Menucos, ubicadas al NE y por fuera del área estudiada. La máxima profundidad del nivel freático registrada en el ámbito estudiado fue de 33,40 m (R26), la mínima de 1,75 m (R97) y el promedio de 7,4 m, lo que indica la existencia de

recarga local, pese a un marcado déficit en la precipitación que abarcó el lapso 2006-2012.

- Teniendo en cuenta: los componentes geológicos y topográficos que caracterizan a la región, las variaciones en la profundidad del nivel del agua, las características del flujo y las propiedades hidroquímicas subterráneas, se puede postular un esquema hidrogeológico conceptual en el que se distinguen claramente 2 tipos de acuíferos. Uno **somero**, situado en los bajos topográficos, donde se concentra el flujo superficial, generado por la lluvia, que actúa como factor principal de recarga y que en general se caracteriza por salinidades de medias a bajas (menores a 3.000 mg/L). Tiene forma lenticular, es del tipo libre o freático, e incluso, en algunos casos, del tipo colgado. Se emplaza tanto en sedimentos como en rocas, se caracteriza por flujos subterráneos locales y se lo aprovecha mediante pozos cavados de poca profundidad, ubicados en ambientes deprimidos del relieve, como cañadones, mallines y bajos. Otro más **profundo**, subyacente al anterior, está contenido en roca, manifiesta un flujo regional SO-NE, con una zona de recarga principal en la Sierra Queupuniyeu y salinidades marcadamente mayores a las del acuífero somero.
- Se observan cambios notorios en la salinidad, con contenidos de SDT que varían entre extremos de 434 mg/L (R75) y 22.350 mg/L (R29-Perf.), con un promedio de 3.234 mg/L, valores estos notoriamente inferiores a los obtenidos en Valcheta. En lo referente a su composición iónica, el agua subterránea de Ramos se puede clasificar como **sulfatada-clorurada-sódica**, con predominio del tipo clorurado por encima de los 10 g/L y de la combinación sulfatada-clorurada entre 1 y 10 g/L; por debajo de 1 g/L dominan las muestras bicarbonatadas, pero sólo en el 13% del total. En todos los casos el catión netamente dominante es el Sodio con el 92% de las muestras con más del 50% de Na.
- Las mayores salinidades (superiores a unos 6 g/L) coinciden con los sectores medios y distantes, considerando el recorrido del flujo subterráneo regional y las menores, inferiores a 1,5 g/L, con los sectores ubicados hacia el ámbito de recarga principal (Sierra Queupuniyeu). También se dan bajas salinidades en sectores intermedios y distantes del flujo subterráneo regional, debido a

procesos de recarga local, hecho que también se explica por la profundidad media a la que se ubica el nivel freático (7,4 m), aún luego de un lapso de 7 años continuados (2006-2012), en el que la lluvia fue inferior al promedio anual.

- El Flúor constituye el principal limitante de la potabilidad, frente a las sustancias peligrosas para la salud, dado que de las 65 muestras analizadas, sólo 1 (R20) se ubicó por debajo del límite de potabilidad (1,5 mg/l). Lo contrario sucede con el Arsénico, debido a que sólo 7 muestras de las 57 analizadas (12% del total), brindaron valores mayores al límite de 50 µg/L. Los nitratos registraron sólo 5 muestras (9% del total) con tenores mayores al límite de potabilidad (50 mg/L). **Resulta llamativa la escasa participación del As en el agua subterránea de Ramos, porque generalmente se presenta asociado al F, especialmente en aguas sódicas, como es el caso de las analizadas.**
- Respecto a la potabilidad por aceptabilidad, el mayor limitante es el Sodio (82% de las muestras analizadas superan el límite de potabilidad – 200 mg/L), seguido por los sulfatos (61%, 250 mg/L), los sólidos disueltos totales (39%, 1.500 mg/L), los cloruros (26%, 250 mg/L) y el pH (14% 6,5-8,5 upH).
- Considerando la aptitud para el ganado, se tiene que las 66 muestras analizadas resultaron aptas para el consumo de los **ovinos adultos**, de los **bovinos para carne** y de los **bovinos lecheros**, dado que el límite de aptitud para la salinidad total es de 12, 10 y 7,2 g/L respectivamente. Para los **equinos** sólo es **inapta** la muestra R62 y para los **porcinos** resultaron inaptas las muestras R14, R16, R62, R71, R83; o sea el 8% del total.

#### **Se recomienda:**

- Al Organismo/s de aplicación de la Provincia que analice/n las normas para **Aguas Minerales**, vigentes en el Código Alimentario Argentino (Artículo 985), debido a que los pobladores rurales se abastecen exclusivamente de agua de “**origen subterráneo**”, que es el factor de mayor influencia en la definición de agua mineral y, de considerarlas adecuadas, promover su aplicación en el ámbito estudiado y en otros de similares características ambientales, socioeconómicas e hidrológicas. Esto porque las normas sobre

potabilidad del COFES fueron diseñadas para todo el país y por ello incluyen los mismos valores máximos limitantes, que además resultan muy estrictos, para regiones con características ambientales, socioeconómicas e hidrológicas, muy diferentes.

- Informar a los pobladores, a través de los organismos de competencia, sobre la necesidad de mejorar la calidad del agua subterránea que consumen, fundamentalmente debido a su alto contenido en Flúor y Sodio. Para ello se podría emplear agua de lluvia, para lo cual sería necesario construir los sistemas de captación en los techos de las viviendas que resulten apropiados y las cisternas para el almacenamiento (aljibes). En términos generales se considera que una proporción adecuada para mejorar la calidad del agua de pozo, es la de una mezcla por partes iguales entre ésta y la de lluvia.
- Informar sobre la necesidad de bajar el consumo de la sal de mesa en las comidas, debido al alto contenido en Sodio del agua subterránea.
- Elaborar un plan para el mejoramiento de los pozos cavados, mediante la limpieza y el calzado de los mismos, y para el mantenimiento de los sistemas de captación y almacenamiento, especialmente molinos de viento y tanques australianos.
- Realizar prospección mediante sondeos geoelectrónicos verticales en el sector centro-N de la zona estudiada, en la estancia Fernández y, en función de sus resultados, decidir si resulta conveniente efectuar una perforación exploratoria en roca.

#### **14. BIBLIOGRAFÍA**

**Auge, M.P. 2013.** “Estudio hidrogeológico de la Región Sur de la Provincia de Río Negro con énfasis en acuíferos de medios fisurados. Etapa II”. Informe de Avance. CFI-ARSE. Inéd.

**Auge, M.P. Espinosa Viale, G. y Sierra, L. 2013.** “Arsénico en el agua subterránea de la Provincia de Buenos Aires”. VIII Congreso Argentino de Hidrogeología. Actas. Tomo II: 58-63. La Plata 2013.

**Caminos, R. 2001.** “Hoja Geológica 4166-I, Valcheta. Provincia de Río Negro. Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico Minero Argentino. Bol. 299.

**Cerana, L.A. 1972.** “Análisis químicos de aguas destinadas a usos agropecuarios”. INTA. Rev. IDIA, nov. Buenos Aires.

**Código Alimentario Argentino. 2012.** “Bebidas Hídricas. Agua y Agua Gasificadas”. Cap. XII. Actualizado a 10/2012.

**Cucchi, R. Busters, A. Lema, H. Dalponte, M. y Espejo, P. 2001.** “Hoja Geológica 4169-II, Los Menucos, Provincia de Río Negro”. Instituto de Geología y Recursos Minerales. Servicio Geológico Minero Argentino. Bol. 265: 1-105. Buenos Aires.

**Gebhard, J.A. Auge, M.P. Marchionni, D.S. y Zuchino B. 2010.** “Procesamiento digital de imágenes satelitales aplicado al estudio hidrogeológico de la región central de la provincia de Río Negro”. CFI: 1-94. ISBN 978-987-510-215-6.

**González Díaz, E. y Malagnino, E. 1984.** “Geomorfología”: 347-364. Relatorio del IX Congreso Geológico Argentino. Geología y Recursos Naturales de la Provincia de Río Negro.

**INDEC. 2012.** “Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas 2010”. Serie B, # 2, T 1:1-371 y Serie B, # 2, T 2:1-406.

**Organización Mundial de la Salud. 2008.** “Guías para la calidad del Agua Potable”. Vol. I. ISBN 92 4 154696 4.

**Ramos, V. y Cortés, J. 1984.** “Estructura e interpretación tectónica”: 317-346. Relatorio del IX Congreso Geológico Argentino. Geología y Recursos Naturales de la Provincia de Río Negro.

**Rörhich, T. & WHI.** “AquiferTest 2.0”.

**Theis, C.V. 1935.** “The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage”. Am. Geophys. Union Trans. 16: 519-524.

**Thornthwaite, C.W. 1948.** “An approach toward a rational classification of climate”. Rep. Geograph. Rev. V XXXVIII. # 1.

**Thornthwaite, C.W. & Mather, J.R. 1955.** “The water balance”. Climatology, Vol. 8, # 1. C.W. Thornthwaite & Associates. Centerton, New Jersey.

**Thornthwaite, C.W. & Mather, J.R. 1957.** “Instructions and tables for computing the potential evapotranspiration and the water balance”. Climate Drexel Inst. of Techn. # 10.