

INFORME TÉCNICO

“Evaluación Hidrogeológica del Acuífero de Calama y del río Salado, usando Herramientas Isotópicas”

**REALIZADO POR:
División de Estudios y Planificación
SDT N° 361**

Santiago, Septiembre de 2014

INDICE

1. INTRODUCCIÓN	3
2. ANTECEDENTES	7
3. ÁREA DE ESTUDIO	7
4. OBJETIVOS	8
4.1 Objetivo General	8
4.2 Objetivos Específicos	8
5. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN.....	8
5.1 Análisis de la información existente	8
6. METODOLOGÍA.....	12
7. ACTIVIDADES	12
7.1 Campañas de Monitoreo	12
7.1.1 Primera Campaña de Monitoreo	13
7.1.2 Segunda Campaña de Monitoreo	23
7.2 Análisis de los resultados.....	29
8. CONCLUSIONES	33

Juan Carlos Salgado González
Adrián Lillo Zenteno
Andrea Osses Vargas
Miguel Ángel Caro Hernández

1. INTRODUCCIÓN

La Región de Antofagasta presenta condiciones de extrema aridez y escasez de recursos hídricos. Esta situación se ha incrementado durante la última década, particularmente por el crecimiento de los sectores productivos, y en especial por el desarrollo de la minería. La aparición de nuevos proyectos en la Región ha generado un aumento en la demanda de aguas subterráneas.

La cuenca del río Loa constituye la principal fuente de abastecimiento de recursos hídricos de la región; sin embargo, el desarrollo productivo, socio cultural y los intereses del medioambiente dependientes de estos recursos se encuentran en una situación crítica desde el punto de vista de su sustentabilidad. En una condición en que por un lado, el río Loa está declarado agotado, y por otro lado, que el sistema río-acuífero está fuertemente interconectado en gran parte de la cuenca, lo que significa que una explotación subterránea intensiva sin el control adecuado impactará necesariamente los recursos superficiales.

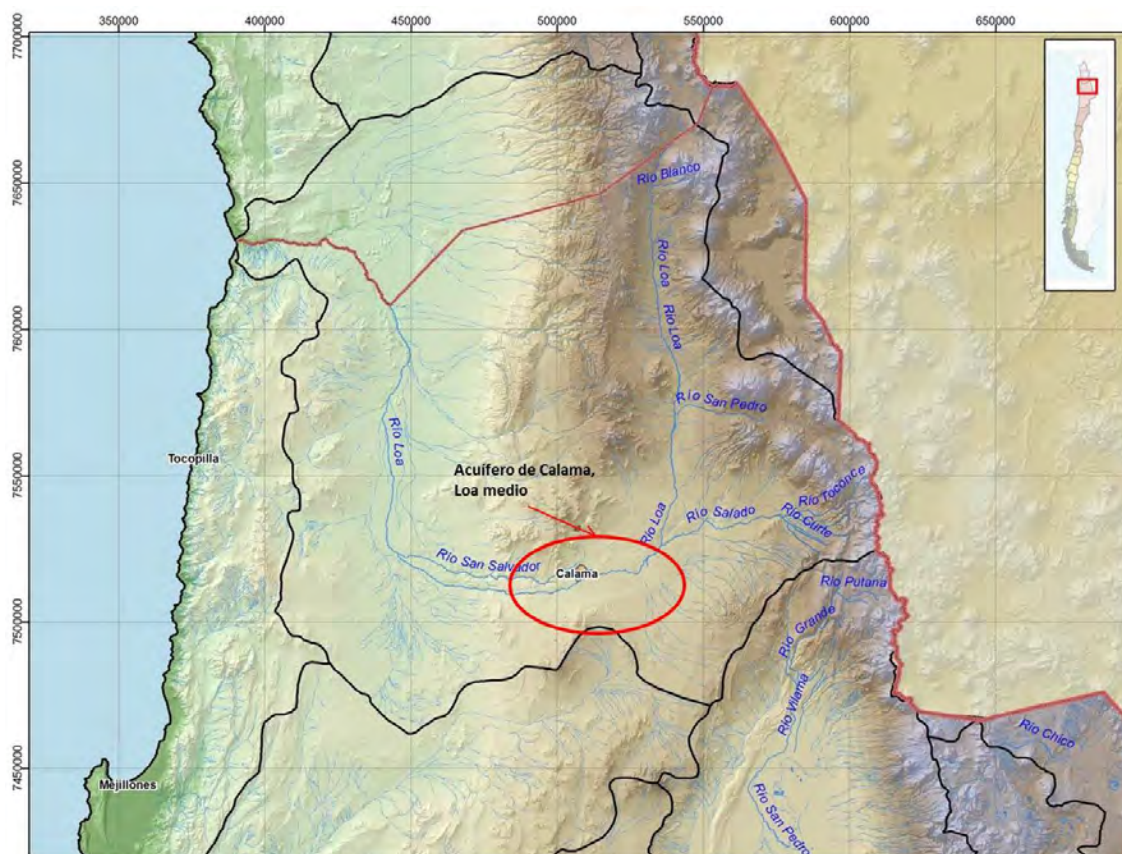


Figura N°1: Ubicación sector acuífero de Calama. Fuente: Elaboración propia

Los acuíferos que componen el acuífero de Calama presentan características perfectamente diferenciables. Un acuífero superior localizado en roca cálcica y espesor medio aproximado de 50m, de naturaleza kárstica debido al flujo preferencial por fracturas de origen sísmico y por una red de canales generados por dilución de la roca (formación Opache). Presenta una rápida renovación y en algunos sectores una estrecha interrelación con el río Loa y su vulnerabilidad estacional, tanto en su recarga como en su descarga. Un acuífero inferior (Formación Calama), muy antiguo, conformado por detritos no homogéneos y mal clasificados, de espesor medio cercano a los 150m, de escasa productividad general y dinámica de flujo lenta, con recarga y descarga sin relación aparente con el río Loa, debido al fuerte confinamiento ejercido por un paquete de sedimentos finos de aproximadamente 100m de espesor que subyace al acuífero superior.

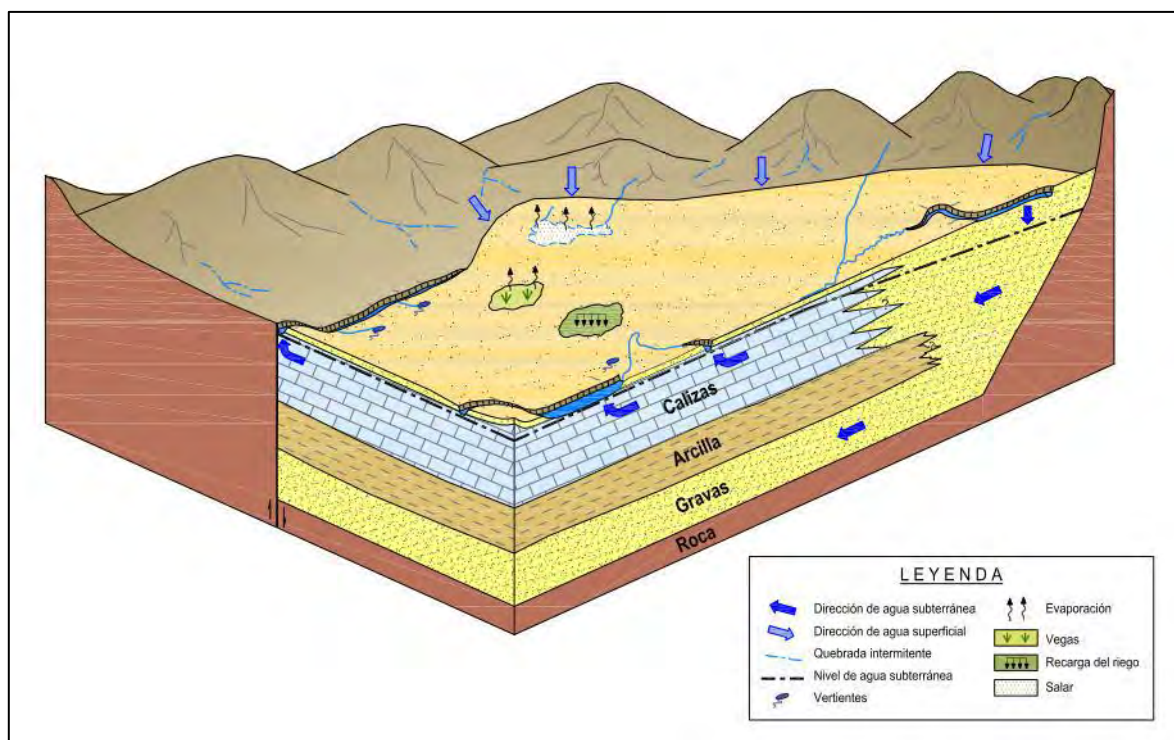


Figura N°2: Modelo conceptual de la cuenca del río Loa. Fuente: Montgomery & Associates, 2009.

Según DGA/Matraz 2012, la recarga de la gran cuenca de Calama proviene subterráneamente desde dos fuentes principales: la más importante provendría como aporte subterráneo desde la cuenca del río Salado, con una marcada huella clorurada sódica con influencias geotermales, y otra fuente importante provendría de forma

subterránea desde aguas arriba del Embalse Conchi con una marca de aguas tipo cloruradas más magnésico-cálcicas.

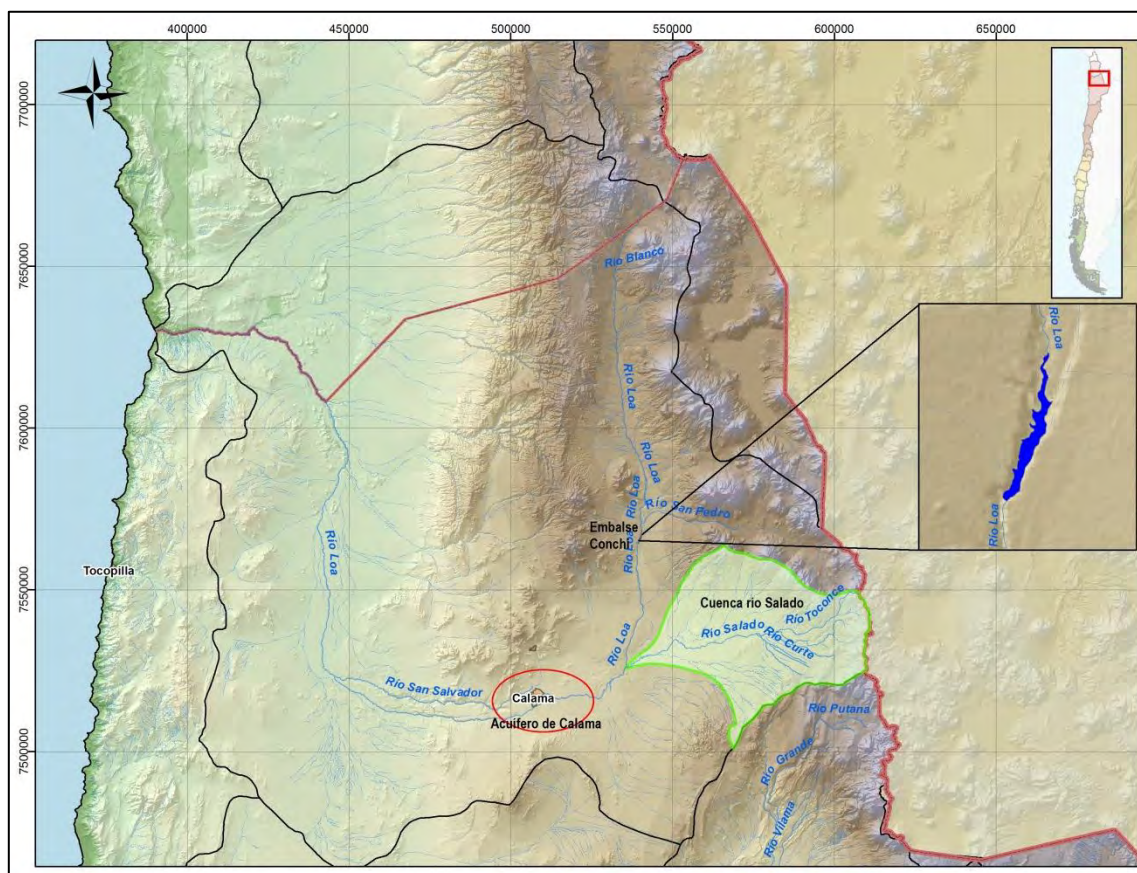


Figura N°3: Sectores de interés. Fuente: Elaboración propia

En este sentido, los isótopos radiactivos o estables contenidos en el agua de forma natural (isótopos ambientales), junto con la Hidroquímica y los trazadores artificiales (radiactivos o no radiactivos) añadidos al agua de forma controlada, constituyen herramientas eficaces en la solución de problemas hidrológicos e hidrogeológicos. De hecho, los isótopos, especialmente los de origen ambiental, vienen siendo utilizados en estudios de Hidrología desde hace más de 50 años, tanto en trabajos de investigación como para resolver problemas reales. Los isótopos que primero se utilizaron en Hidrología fueron el ^{18}O , el ^2H (deuterio), el ^3H (tritio), el ^{14}C , el ^{13}C .

Finalmente el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), en el marco de su misión de promover el uso pacífico de las técnicas nucleares, auspicia proyectos tanto de carácter nacional como regional de investigación aplicada en el campo de los

recursos hídricos en los países en vía de desarrollo. En estos proyectos se llevan a cabo estudios que conllevan el uso de técnicas hidrogeoquímicas e isotópicas, dirigidos a evaluar los recursos hídricos en algunas zonas de interés, especialmente aquellas donde son más evidentes los problemas de acceso al agua, tanto en cantidad como en calidad. El proyecto RLA 7/016, llevado a cabo en 12 países de América Latina entre los años 2012 y 2014, es un ejemplo del esfuerzo conjunto entre el Organismo y los países ejecutores de tales proyectos por profundizar en el conocimiento de acuíferos altamente explotados en Latinoamérica.

En Chile, el liderazgo en la materia lo lleva la Comisión Chilena de Energía Nuclear (CCHEN) con quienes la Dirección General de Aguas (DGA) conformó una alianza y así obtener los fondos para ejecutar un proyecto de aplicación de técnicas isotópicas y así estudiar el origen de las aguas del río Salado cercano a Calama en la Región de Antofagasta.

2. ANTECEDENTES

En base a lo antes expuesto, en el año 2012 se comienza a gestionar entre profesionales de la División de Estudios y Planificación (DEP) de la DGA y de la CCHEN un convenio para iniciar un estudio en la zona de interés basándose en herramientas isotópicas e hidroquímicas.

Con la hipótesis planteada por DGA/Matraz (2012), más otros estudios en el acuífero de Calama se define estudiar la cuenca del río Salado y la posible conexión existente con el acuífero del Loa medio.

Es así como el 15 de Enero de 2013, se firma un convenio entre la Dirección General de Aguas (DGA) y la Comisión Chilena de Energía Nuclear (CCHEN) denominado **"EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA DEL ACUÍFERO DE CALAMA USANDO HERRAMIENTAS ISOTÓPICAS"**.

3. ÁREA DE ESTUDIO

La cuenca del río Salado posee un área de 2.288 km² y una altura máxima de 5.100 msnm, tiene una longitud aproximada de 82 km y es afluente del río Loa. Sus principales efluentes son el río Curti y el Río Toconce. El río Salado tiene un caudal medio mensual de 600 l/s.

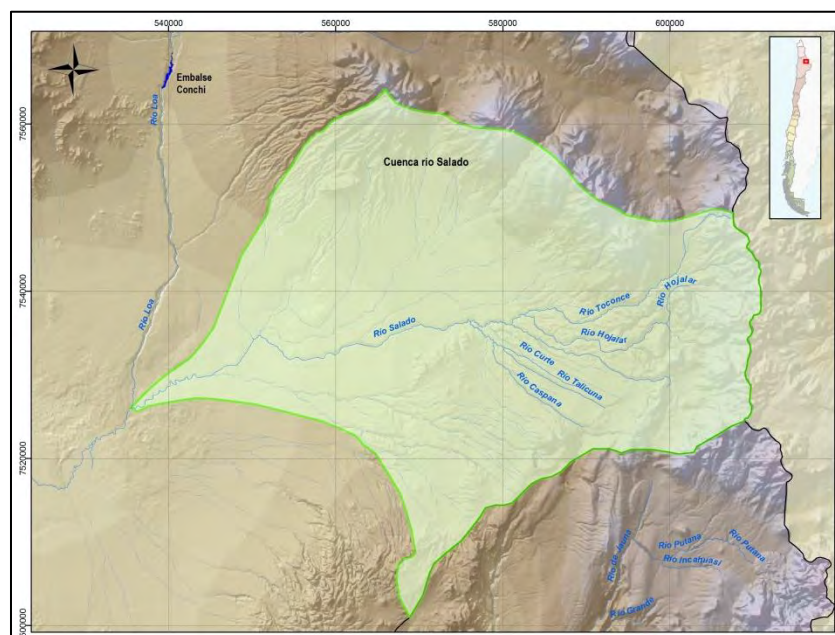


Figura N°4: Cuenca río Salado. Fuente: Elaboración propia

4. OBJETIVOS

4.1 Objetivo General

Determinar, a través de herramientas isotópicas, la conexión entre el acuífero de la cuenca del río Salado y los acuíferos (superior e inferior) del Loa medio en Calama, para así establecer si el río Salado es o no la principal recarga al acuífero de Calama.

4.2 Objetivos Específicos

- Monitoreo de la cuenca del río Salado
- Monitoreo en la cuenca del río Loa Alto
- Monitoreo de ambos acuíferos en la cuenca del Loa medio
- Establecer conexión o desconexión entre ambos acuíferos.

5. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN

5.1 Análisis de la información existente

La Dirección General de Aguas, en su afán de generar más información del acuífero de Calama en la cuenca del río Loa, ha desarrollado en el último tiempo estudios que ayudan a mejorar el conocimiento de la dinámica y el comportamiento del acuífero. Los Estudios desarrollados en los últimos años son:

1. **Estudio acuífero de Calama sector medio del río Loa, región de Antofagasta**, desarrollado por DGA/Matraz Consultores y la Universidad Politécnica de Cataluña en el año 2012.
2. **Levantamiento de información hidrogeológica región de Antofagasta**, desarrollado por DGA/Mayco Consultores en el año 2013.
3. **Evaluación de los Recursos Hídricos, sectores Calama y Llalqui**, desarrollado por la DGA en el año 2003.
4. **Informe Consolidado Trianual Monitoreo Hidrogeológico Plan de Alerta Temprana Pozo P-10 Período: Septiembre 2010 – Marzo 2013**. Preparado por Montgomery & Associates Consultores Ltda. para Minera El Tesoro.

En cada estudio se hizo un análisis de la información y se identificó su aporte al presente estudio, en los siguientes acápite se enumeran cada uno de ellos y su respectivo aporte.

1.- Estudio acuífero de Calama sector medio del río Loa, Región de Antofagasta (ref.1):

- Objetivo: Construir un modelo hidrogeológico del acuífero de Calama, que a partir de toda la información hidrológica disponible, permita dar coherencia y seguimiento de los distintos planes de seguimiento, monitoreo y control de extracciones existentes.
- Se realizaron prospecciones geofísicas con el método gravimétrico, abarcando 200 km en total.
- Las principales unidades hidrogeológicas presentes en la zona corresponden a la UH-1, formada por depósitos de cobertura aluvio-evaporíticos y no saturados; la UH-2 que engloban los materiales calcáreos del acuífero superior del Loa; las UH-3 y UH-4 que conjuntamente conforman el acuitardo limo-arcilloso; la UH-5 que conforma el acuífero inferior de Calama compuesto por gravas y conglomerados y la UH-6 compuesta por el basamento ígneo-metamórfico. De este modo se pueden suponer la existencia de dos unidades acuíferas principales: el acuífero superior, de carácter libre, y el acuífero inferior, de carácter semiconfinado. Ambos acuíferos se encuentran separados por un acuitardo en la gran mayoría del área modelada.
- Se ha observado a través del análisis hidroquímico que la recarga de la gran cuenca de Calama proviene subterráneamente desde dos fuentes principales: la más importante provendría de la cuenca del río Salado con una marcada huella clorurada sódica con influencias geotermiales, y otra fuente importante provendría desde aguas arriba del embalse Conchi con una marca de aguas tipo cloruradas más magnésico-cálcicas.
- No se han desarrollado estudios hidrogeológicos en las sub-cuencas que alimentan a la gran cuenca de Calama, y por lo tanto parte del conocimiento que existe sobre las fuentes de alimentación de la hidrogeología de Calama se basan en supuestos e hipótesis que necesitan ser validados.

2.- Levantamiento de información hidrogeológica región de Antofagasta (ref.2)

- Objetivo: revisión y análisis de antecedentes geofísicos, geológicos para definir una campaña de prospección geofísica, y a partir de esto, generar una base de datos consolidada de la información de las características y geometría del acuífero ubicado aguas arriba de la ciudad de Calama.
- Ubicación de los perfiles:



Figura N°5: Ubicación de perfiles geofísicos

- La interpretación del perfil N°1 fue la siguiente

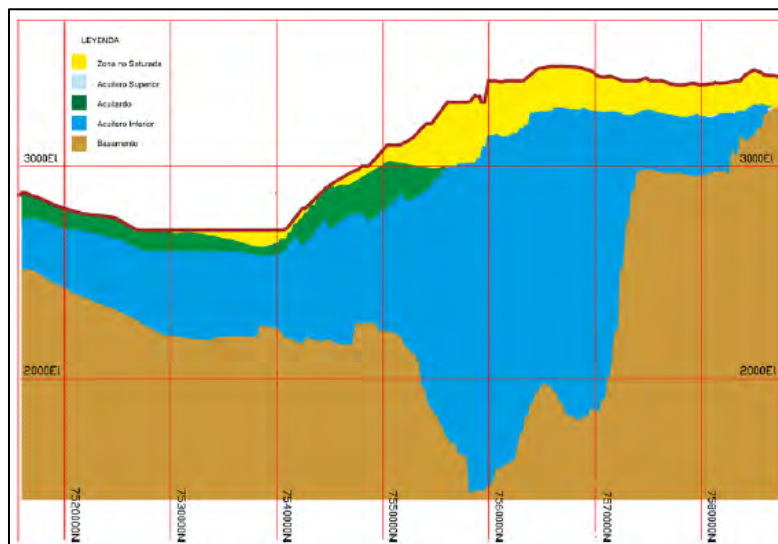


Figura N°6: Interpretación de perfil TEM1

3.- Evaluación de los Recursos Hídricos, sectores Calama y Llalqui, (ref.3)

- Objetivo: integrar la información existente sobre el sistema hídrico de la cuenca del Loa, y desarrollar los análisis correspondientes, de modo de evaluar la disponibilidad de aguas subterráneas en sectores específicos, y los efectos de una explotación subterránea intensificada sobre los recursos superficiales. El estudio contiene los resultados de un estudio hidrológico y balance hídrico de la cuenca del Loa, los resultados de una modelación hidrogeológica en el sector específico de Calama, y algunas interpretaciones de información hidrogeoquímica en apoyo a los resultados hidrológicos.
- Se han esquematizado las distintas conductividades y vías evolutivas presentes para las aguas tanto del curso superficial del río Loa como de las napas subterráneas. Se presenta un diagrama que se ha efectuado sobre la base del promedio de los valores observados, por lo tanto no representa sino la generalidad de los procesos químicos dentro de la cuenca. En él se puede observar la alternancia entre las vías sulfatadas neutras y alcalinas, y además cálcicas a partir del ingreso del escurrimiento del río Salado al Loa, hasta la desembocadura.

Estas sales cálcicas están ligadas a la presencia de formaciones sedimentarias. Sin embargo, de la alta salinidad observada en estos cursos de agua, principalmente en altas concentraciones de Cl, Na y Ca, se infiere la ocurrencia de disolución de evaporitas y dilución de salmueras residuales. El aumento de salinidad producido por la evaporación, tendría un rol secundario, salvo en el curso inferior del río Loa, debido a la evaporación desde Salares, desde el propio cauce del río, y por la actividad de riego. No obstante, por definición, esta evaporación no sería la responsable del cambio de las vías evolutivas.

4.- La referencia N°4 es un compilado trianual de información presentada por Minera El Tesoro (MET) referida a su Plan de Alerta Temprana en el sector de Calama. En dicho informe se incluyen 4 pozos que son parte de las campañas de monitoreo que se detallan a más adelante. Con respecto a los resultados presentados en el informe trianual, se puede obtener la siguiente gráfica.

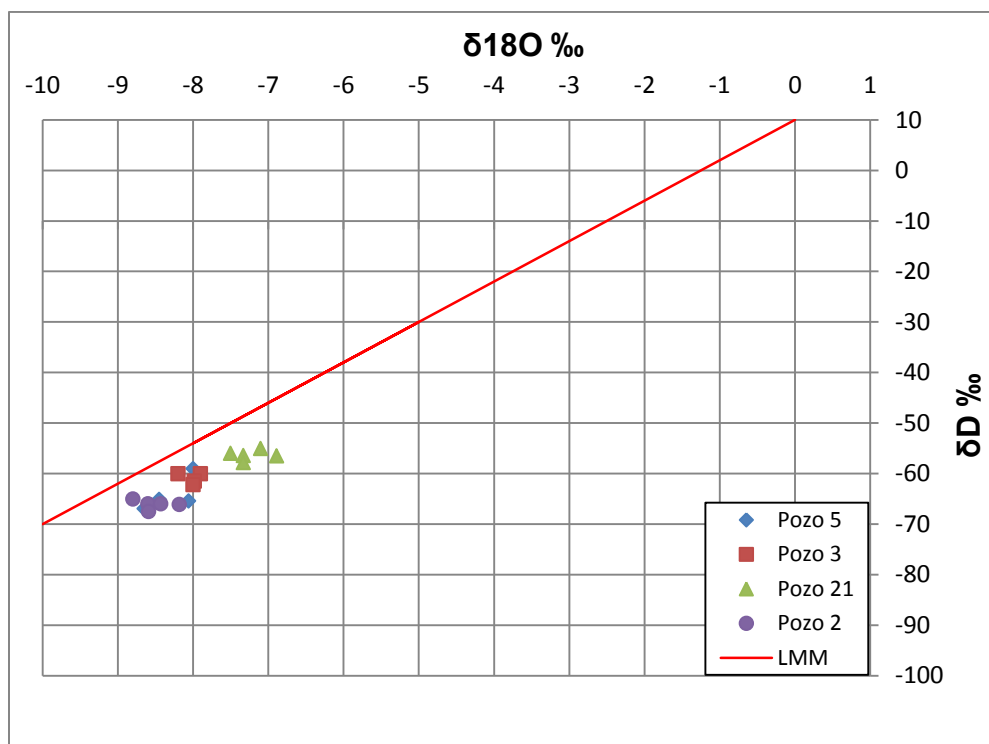


Figura N°7: Información MET

6. METODOLOGÍA

Una vez obtenidos los datos de terreno de las dos campañas de terreno, las cuales se describen en los próximos capítulos, se ingresaron los datos al software Diagrammes y se obtuvieron las gráficas correspondientes. Se hizo una sectorización de las muestras según su fuente y ubicación espacial. Posterior a eso, se analizó la ubicación de las muestras en los gráficos y se concluye al respecto.

7. ACTIVIDADES

7.1 Campañas de Monitoreo

Con los antecedentes ya descritos, se procede a planificar las campañas de terreno, enfocándose principalmente en la cuenca del río Salado. En esta etapa se recibió colaboración logística de profesionales de la empresa Matraz Consultores, debido a su conocimiento de la zona, principalmente en la localización de vertientes. También fue muy importante la coordinación con la Dirección Regional de Aguas, de la Región de

Antofagasta, para la ubicación de ciertos lugares de interés para el monitoreo como lo son las Estaciones DGA, tanto subterráneas como superficiales.

Una colaboración importante fue la realizada por Minera El Tesoro (MET), quienes brindaron toda la ayuda solicitada, tanto en gabinete como en terreno.

Finalmente, se planificó un monitoreo que permita establecer y conocer el comportamiento del flujo superficial y subterráneo en la cuenca del río Salado, a través de la hidroquímica. Se definen puntos de muestreo superficial, subterráneo y manantiales en la parte alta de la cuenca.

7.1.1 Primera Campaña de Monitoreo

La primera campaña de monitoreo se realizó entre los días 13 y 17 de Mayo del año 2013.

En la **Figura N°8** se muestra un mapa de ubicación de los puntos muestreados

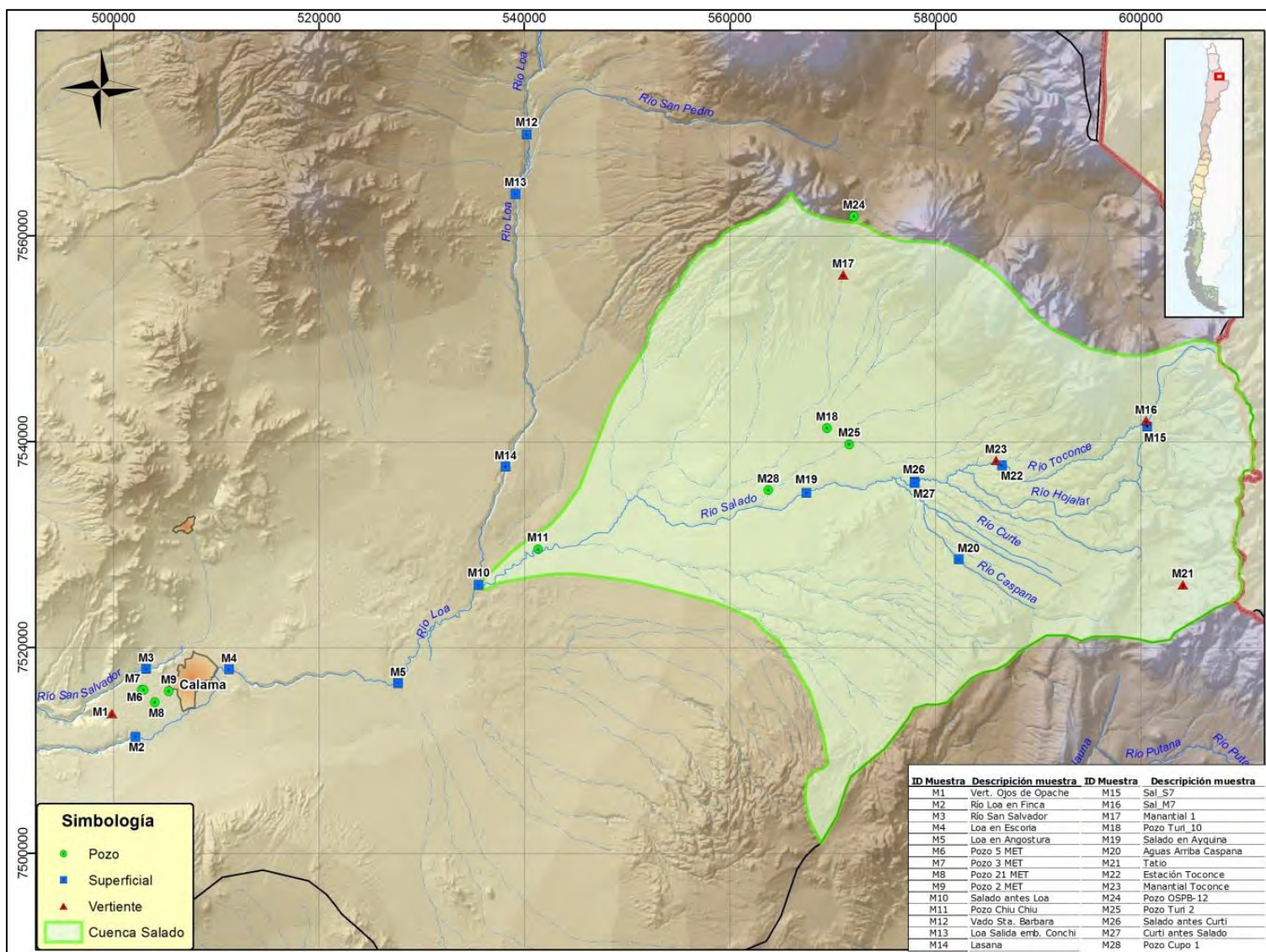


Figura N°8: Ubicación de puntos de monitoreo, Campaña I, Mayo 2013

En la primera campaña de terreno se monitorearon parámetros In Situ (pH, CE y T°), elementos mayoritarios (Aniones y Cationes), Isótopos ambientales (²H, ¹⁸O), 10 muestras de Tritio y 5 de ¹⁴C. Los resultados se presentan en la siguiente tabla:

Tabla N°1: Resultados del monitoreo hidroquímico de la Primera Campaña

ID Muestra	Nombre	pH	T (°C)	Cond_lab mS/cm	pH Lab	T (Wa)	Na mg/L	K mg/L	Mg mg/L	Ca mg/L	Si mg/L	SiO2 mg/L	Cl mg/L	SO4 mg/L	NO3 mg/L	NO2 mg/L	PO4 mg/L	HCO3 mg/L
M1	Vert. Ojos de Opache	7,7	16,1	7,93	7,76	16,1	1251	53,5	142	330	41,9	89,6	2438	305	11	2	5	454
M2	Río Loa en Finca	8,25	11,0	6,99	7,7	11	1141	44,9	132	238	36,2	77,4	2167	243	5	2	5	350
M3	Río San Salvador	8,38	9,5	8,85	8,57	9,5	1463	55,9	203	333	31,1	66,5	2058	1204	514	2	5	236
M4	Loa en Escoria	8,03	12,5	6,55	7,86	12,5	1020	35,5	125	238	35,2	75,2	1656	222	5	2	5	436
M5	Loa en Angostura	7,64	13,8	6,09	7,83	13,8	943	37,4	137	284	35,7	76,3	1810	181	5	2	5	470
M6	Pozo 5 MET	7,2	21,4	5,89	7,8	21,4	1004	25,5	126	243	23,4	50,1	1567	551	11,4	2	5	338
M7	Pozo 3 MET	7,27	15,8	6,63	7,67	15,8	1102	39	148	301	41,8	89,4	1994	292	31,4	2	5	400
M8	Pozo 21 MET	7,14	16,0	7,98	7,563	16	1363	42,6	142	263	40,3	86,1	2509	286	13,9	2	5	477
M9	Pozo 2 MET	7,29	22,8	4,60	7,63	22,8	770	28,3	115	183	31,1	66,5	1366	246	14,6	2	5	297
M10	Salado antes Loa	7,9	11,3	6,83	8,19	11,3	1219	53,8	111	199	37,2	79,6	2121	103	5	2	5	388
M11	Pozo Chiu Chiu	8,32	13,1	10,58	8,04	13,1	1877	169	131	192	7,5	16,1	3591	94,5	5	2	5	239
M12	Vado Sta. Barbara	6,97	14,8	2,99	7,7	14,8	383	58,3	82,7	180	41,3	88,5	611	172	5	2	5	648
M13	Loa Salida emb. Conchi	8,08	10,1	2,85	7,79	10,1	402	54,5	83,7	151	38,3	81,8	601	181	5	2	5	512
M14	Lasana	8,01	10,8	2,73	7,87	10,8	396	24,8	80,6	113	35,2	75,4	597	170	5	2	5	440
M15	Sal_S7	7,65	23,1	0,40	9,16	23,1	68,1	6,46	5,13	10,8	36	76,9	57	46,4	5	2	5	75,6
M16	Sal_M7	7,21	27,7	0,90	9,23	27,7	145	11,3	7,76	23,9	43,8	93,6	179	83,3	5	2	5	86,6
M17	Manantial 1	6,34	21,5	3,26	7,25	21,5	380	29,8	118	189	50,5	108	732	178	5	2	5	634
M18	Pozo Turi_10	6,2	26,2	8,74	7,74	26,2	1364	149	108	335	55,4	118	2606	68,8	5	2	5	958
M19	Salado en Ayquina	7,35	16,8	5,63	7,98	16,8	840	63,4	68	241	45,8	97,9	1637	91,3	5	2	5	512
M20	Aguas Arriba	7,64	5,8	0,74	7,79	5,8	112	5	21,4	60,8	26,4	56,5	94,8	128	5	2	5	118

ID Muestra	Nombre	pH	T (°C)	Cond_lab mS/cm	pH Lab	T (Wa)	Na mg/L	K mg/L	Mg mg/L	Ca mg/L	Si mg/L	SiO2 mg/L	Cl mg/L	SO4 mg/L	NO3 mg/L	NO2 mg/L	PO4 mg/L	HCO3 mg/L
	Caspana																	
M21	Tatio	6,9	75.0	0,55	7,63	75	27,4	8,29	27,7	147	56	119	2,7	77,2	5	2	5	240
M22	Estación Toconce	7,9	15.0	1,03	9,23	15	132	25,3	25,1	52,1	40	85,5	206	66,7	5	2	5	154
M23	Manantial Toconce	7,86	9,1	0,77	8,68	9,1	43,7	10,8	45,3	77,6	45	96,2	73,3	27	5	2	5	353
M24	Pozo OSPB-12	6,54	24,6	4,25	7,02	24,6	519	51	159	238	53,1	114	966	202	5	2	5	753
M25	Pozo Turi 2	6,9	16,6	2,87	8,1	16,6	422	47	49,6	115	49,3	105	608	18,2	5	2	5	532
M26	Salado antes Curti	7,53	9,6	4,32	8,22	9,6	759	71,7	31	124	48	103	1219	82,4	5	2	5	336
M27	Curti antes Salado	7.00	6,6	12,83	7,25	6,6	1829	227	194	432	24,8	53,1	4051	110	5	2	5	987
M28	Pozo Cupo 1	6,48	15,4	11,50	7,14	15,4	1829	263	147	458	43,1	92,2	3625	106	5	2	5	1140

Tabla N°2: Resultados del monitoreo Isotópico de la Primera Campaña

Cód.Lab.	Identificación	$\delta\text{‰}^2\text{H}$	$\delta\text{‰}^{18}\text{O}$	^3H (UT)	C-14
M-1	Vertiente Ojos de Opache	-50.9	-7.54		
M-2	Río Loa en Finca	-49.2	-7.35		
M-3	Río San Salvador	-56.9	-7.58		
M-4	Loa en Escorial	-56.1	-7.33		
M-5	Loa en Angostura	-56.7	-7.44		
M-6	Pozo 5 MET	-64.3	-8.12	0.2 ± 0.3	26.25 ± 0.19
M-7	Pozo 3 MET	-61.9	-7.83	0.4 ± 0.3	
M-8	Pozo 21 MET	-54.4	-7.14		
M-9	Pozo 2 MET	-62.6	-8.45	0.0 ± 0.3	29.29 ± 0.20
M-10	Salado antes del Loa	-46.0	-6.76	0.3 ± 0.3	
M-11	Pozo Chiu -Chiu	-41.9	-6.89		
M-12	Vado Santa Barbara	-68.3	-9.85		
M-13	Loa salida embalse Conchi	-60.9	-8.47		
M-14	Lasana	-60.5	-8.44		
M-15	Sal-S7	-56.7	-8.80		
M-16	Sal -M7	-75.1	-10.22	0.0 ± 0.3	
M-17	Manantial 1	-64.5	-8.90	0.1 ± 0.3	
M-18	Pozo Turi 10	-55.0	-8.36		
M-19	Salado en Ayquina	-50.3	-6.74		
M-20	Aguas Arriba Caspana	-42.5	-5.84	0.1 ± 0.3	
M-21	Tatio	-51.0	-7.09	0.5 ± 0.3	3.16 ± 0.06
M-22	Estación Toconce	-60.1	-8.15		
M-23	Manantial Toconce	-42.9	-7.23	0.5 ± 0.4	
M-24	Pozo OSPB	-63.3	-9.22	0.0 ± 0.3	0.35 ± 0.02
M-25	Pozo Turi-2	-46.7	-8.19		
M-26	Salado antes Curti	-54.0	-6.67		
M-27	Río Curti antes de Salado	-35.6	-4.40		
M-28	Pozo Cupo 1	-46.3	-7.53		3.17 ± 0.06

En el análisis de las 28 muestras, éstas se clasificaron según su origen (pozo, superficial y vertiente) y según la subcuenca a la que pertenecen. Los grupos o sectores de análisis son los siguientes:

Tabla N°3: grupos de análisis

Grupo	Nombre grupo	Muestras
1	Pozos Salado	M11-M18-M24-M25-M28
2	Superficial Salado	M15-M19-M20-M22-M26-M27
3	Vertiente Salado	M16-M17-M21-M23
4	Superficial Loa Alto	M10-M12-M13-M14
5	Superficial Loa Medio	M2-M3-M4-M5
6	Pozos Loa Medio (ac. Inferior)	M6-M9
7	Pozos Loa Medio (ac. Superior)	M7-M8
8	Vertiente Loa	M1

Para el análisis de los datos se utilizó el software gratuito Diagrammes, descargable desde <http://www.lha.univ-avignon.fr/LHA-Logiciels.htm>

El software fue desarrollado por el “Laboratorio de Química Analítica e Isotópica” de la Universidad de Aviñón de Francia y corresponde a un software intuitivo, el cual permite realizar los principales gráficos utilizados en hidroquímica a nivel mundial, como son el diagrama de Piper, Stiff, Schoeller-Berkalov, etc... Además se puede trabajar directamente con los datos isotópicos y realizar los gráficos que se deseen combinando 2 o más parámetros.

7.1.1.1 Análisis de resultados con Diagrammes

El análisis se realizó utilizando Diagramas de Piper, los cuales se utilizan para representar la proporción de tres componentes en la composición química de un conjunto o de una sustancia. En hidroquímica se utiliza un triángulo para los cationes principales y otro para los aniones.

El diagrama de Piper está formado por dos triángulos con un rombo, el que recoge la información de ambos triángulos como se muestra en la siguiente figura.

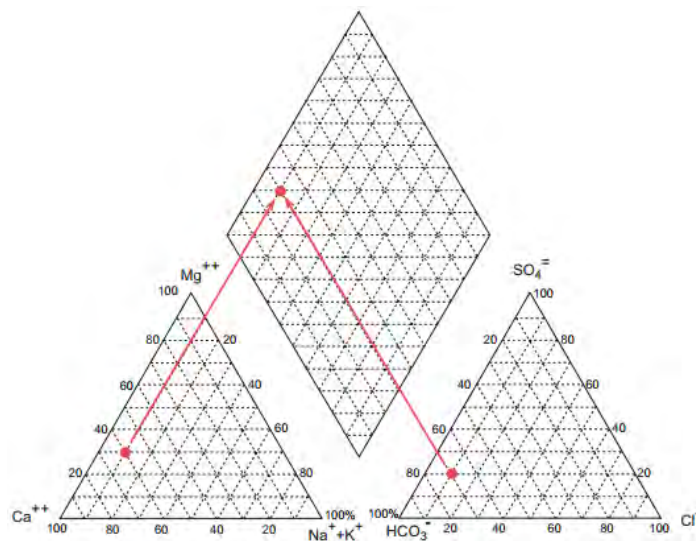
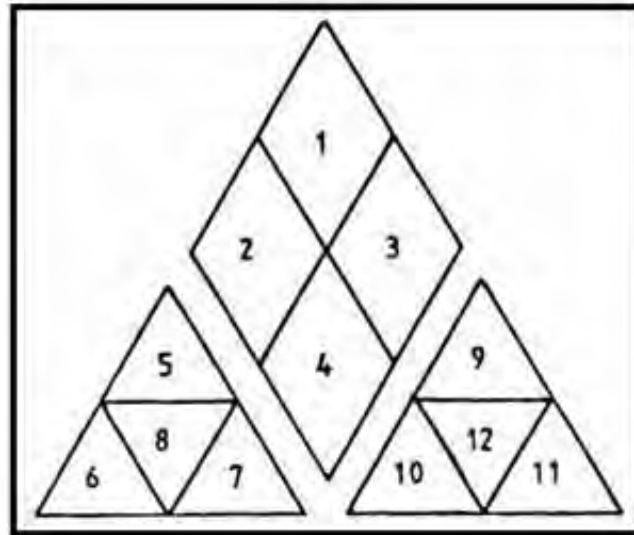


Figura N°9: Funcionamiento del Diagrama Piper

A continuación se presenta el diagrama de Piper con los resultados obtenidos de la primera campaña.



- 1- Aguas sulfatadas y/o cloruradas, cálcicas y/o magnésicas.
- 2- Aguas bicarbonatadas cálcicas y/o magnésicas.
- 3- Aguas cloruradas y/o sulfatadas sódicas.
- 4- Aguas bicarbonatadas sódicas.
- 5- Aguas magnésicas.
- 6- Aguas cálcicas.
- 7- Aguas sódicas.
- 8- Aguas magnésicas, cálcicas y sódicas.
- 9- Aguas sulfatadas.
- 10- Aguas bicarbonatadas.
- 11- Aguas cloruradas.
- 12- Aguas sulfatadas, bicarbonatadas y cloruradas.

Figura N°10: Funcionamiento del Diagrama Piper

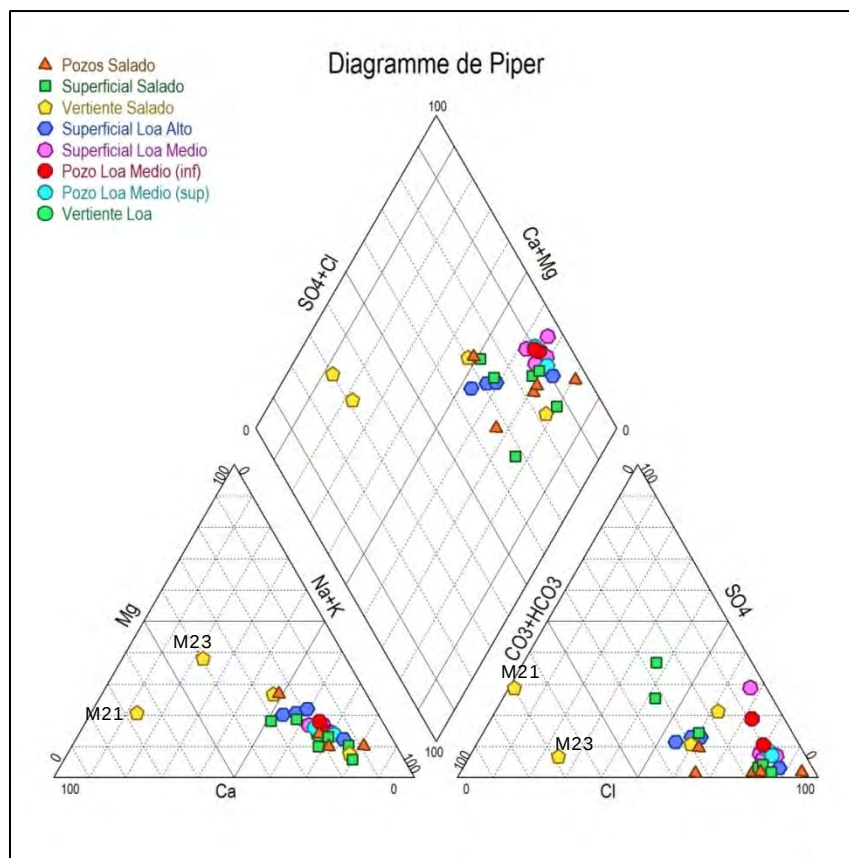


Figura N°11: Resultado Primera Campaña de Monitoreo

Como se aprecia en la figura la mayoría de las muestras presenta un comportamiento Clorurado Bicarbonatado Sódico, excepto las muestras de las vertientes de la cuenca del río Salado que tienen un comportamiento más bicarbonatado. Se analizará más en extenso en los siguientes capítulos.

Con respecto al análisis isotópico, cabe señalar, que los Isótopos ambientales Estables (^{18}O y ^2H) no se desintegran de forma espontánea o su vida media es superior a los 3000 millones de años, de ahí el uso de éstos como trazadores del origen de los solutos y de procesos. La abundancia de un isótopo es un valor muy pequeño, por lo que se expresa como la variación del isótopo menos abundante respecto del más abundante.

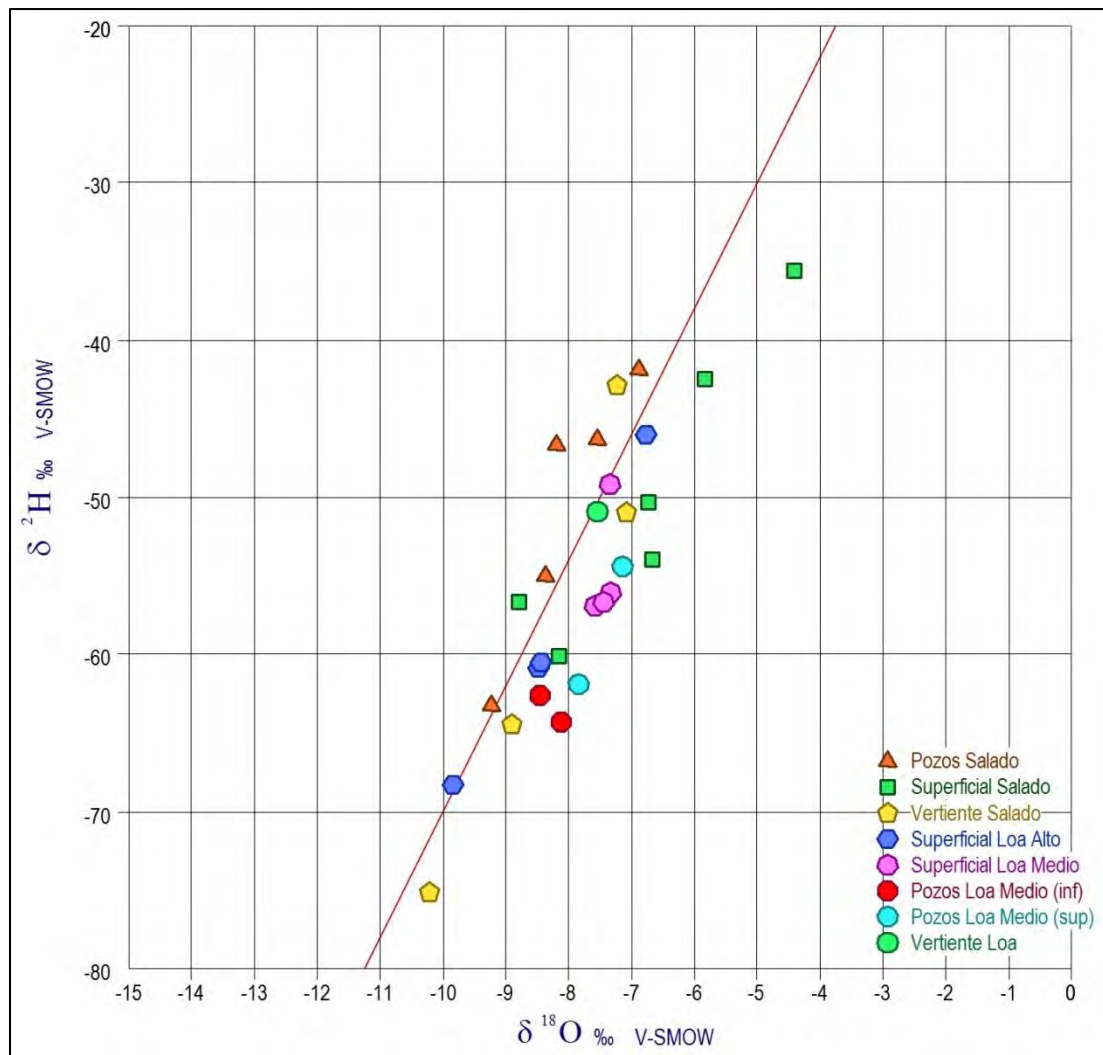


Figura N°12: Relación entre las mediciones de Oxígeno-18 y Deuterio de agua

El gráfico no indica muestras muy evaporadas, de hecho, todas se encuentran muy cerca de la LMM, lo que indica que la recarga principal es producto de la precipitación ocurrida en la parte alta de la cuenca.

7.1.2 Segunda Campaña de Monitoreo

La segunda campaña de monitoreo se realizó en mayo del año 2014, en los siguientes puntos de muestreo:

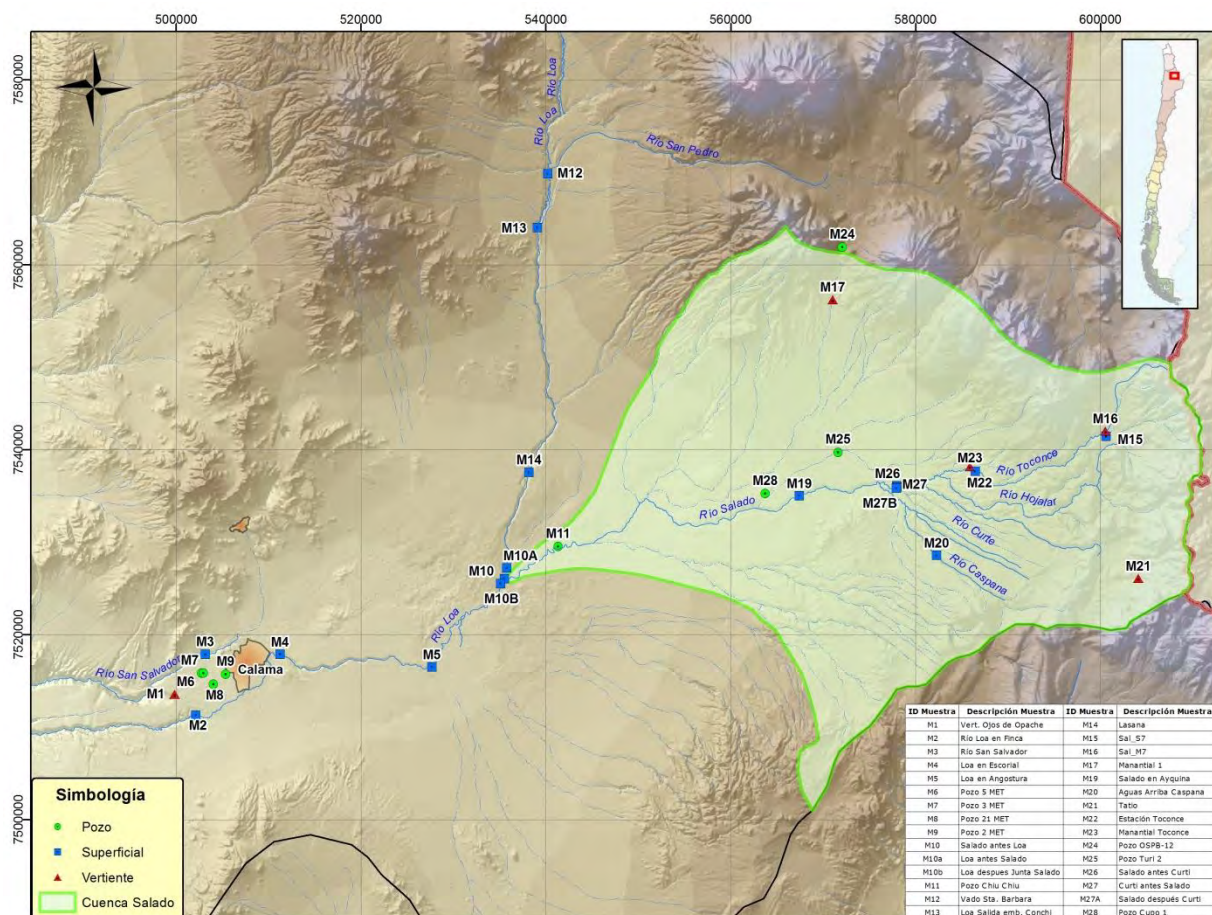


Figura N°13: Ubicación de puntos de monitoreo, Campaña II, Mayo 2014

Como se aprecia en la figura, en esta campaña se realizaron 3 muestras más (M10a, M10b y M27a), sin embargo, la muestra M18, no pudo ser tomada por encontrarse el pozo tapado.

Los resultados de los análisis In Situ y de los Elementos Mayoritarios se presentan en la siguiente tabla:

Tabla N°4: Resultados del monitoreo hidroquímico de la Segunda Campaña

ID Muestra	Nombre	pH	T °C	Cond_lab mS/cm	pHLab	Na mg/L	K mg/L	Mg mg/L	Ca mg/L	Si mg/L	Cl mg/L	SO4 mg/L	NO3 mg/L	NO2 mg/L	PO4 mg/L	HCO3 mg/L
M1	Vert. Ojos de Opache	7.35	16.2	5.32	8.01	1312	113	139	307	37	2386	297	12.6	2	5	464
M2	Río Loa en Finca	8.04	13.2	5.67	8.15	1488	119	156	279	33.1	2619	366	6.4	2	5	366
M3	Río San Salvador	7.87	18.9	5.83	7.94	1522	148	180	313	28.2	2026	1133	507	2	5	240
M4	Loa en Escorial	7.84	11.9	4.41	7.95	1104	85.8	117	258	31.1	2038	208	5	2	5	439
M5	Loa en Angostura	7.16	13.5	4.2	7.76	1020	81.8	110	245	32.7	1828	200	5	2	5	483
M6	Pozo 5 MET	7.48	21	3.78	7.6	954	51.1	119	235	18	1520	532	10.7	2	5	307
M7	Pozo 3 MET	7.36	16.2	4.38	7.52	1042	87.9	110	255	34.7	1963	293	35.2	2	5	404
M8	Pozo 21 MET	7.31	16.4	5.31	7.48	1340	108	141	303	36.2	2597	300	10.9	2	5	476
M9	Pozo 2 MET	7.2	23.3	3.11	7.71	793	46	109	207	24	1356	328	12.9	2	5	261
M10	Salado antes Loa	7.99	12.6	4.67	8.06	1277	119	111	200	28.4	2238	115	5	2	5	378
M10a	Loa antes Salado	8.16	13.9	2.28	8.14	497	35.4	128	174	27.8	826	232	6.3	2	5	461
M10b	Loa después Junta Salado	8.24	13.4	3.77	7.98	992	86.3	116	190	27.9	1641	156	5	2	5	413
M11	Pozo Chiu Chiu	8.33	14.2	10.7	8.33	3346	298	219	257	4.57	5730	33.8	15	2	5	260
M12	Vado Sta. Barbara	6.85	16.2	2.08	7.13	419	29.2	116	235	35.6	652	177	5	2	5	673
M13	Loa Salida Emb. Conchi	8.2	10.5	2.05	7.7	442	32.8	124	166	34.7	681	189	5	2	5	510
M14	Lasana	8.08	9.3	2	8.05	435	31.6	122	143	31.4	673	174	5	2	5	503
M15	Sal_S7	7.66	23.1	0.28	7.67	76	9.38	6.8	12.7	29.3	57.5	47.4	5	2	5	81.7
M16	Sal_M7	7.16	27.7	0.61	7.28	172	15.3	10	29	35.1	183	90.3	5	2	5	98.8
M17	Manantial 1	6.32	18.4	2.12	6.63	373	35	145	225	40.2	723	162	5	2	5	609
M19	Salado en Ayquina		14.7	4.19	6.29	952	81.2	66	232	35	1794	98.7	300*	2	5	254
M20	Aguas Arriba Caspana	7.16	9.5	0.46	7.37	79.9	5.47	17.7	51.2	21.6	91.4	70.9	5	2	5	167
M21	Tatio	7.85	80	0.34	7.76	34.9	11.8	17.1	63.7	51.2	2.1	50.9	5	2	5	279
M22	Estación Toconce	7.94	12.6	0.72	8.07	138	12.6	24	47.5	31	209	67.6	5	2	5	143
M23	Manantial Toconce	7.6	8.9	0.51	7.7	44	5.86	45	75.4	36.8	71.6	26.7	5	2	5	364

*Dato está siendo reanalizado.

ID Muestra	Nombre	pH	T °C	Cond_lab mS/cm	pHLab	Na mg/L	K mg/L	Mg mg/L	Ca mg/L	Si mg/L	Cl mg/L	SO4 mg/L	NO3 mg/L	NO2 mg/L	PO4 mg/L	HCO3 mg/L
M24	Pozo OSPB-12	6.43	25.3	2.79	6.68	480	45.7	163	227	45.1	999	174	5	2	5	805
M25	Pozo Turi 2	6.48	16.8	1.8	6.42	393	44.1	47.8	113	40.1	633	72.1	7.7	2	5	494
M26	Salado antes Curti	7.94	10.8	3.42	7.7	458	39.1	19	76.9	19.9	1517	81.6	5	2	5	437
M27	Curti antes Salado	7.2	3.4	8.34	7.14	2345	111	182	379	21.3	4132	118	5	2	5	974
M27A	Salado después Curti	7.69	10.1	3.7	7.7	1004	87.7	44.8	166	39.6	1658	94.3	5	2	5	452
M28	Pozo Cupo 1	6.25	16.7	7.58	6.47	1871	2.89	158	425	36	3569	101	5	2	5	1147

En esta campaña, y evaluando los resultados de la primera, se decide no monitorear Tritio, dada la baja concentración del mismo. (ver **Tabla N°2**).

Tabla N°5: Resultados del monitoreo Isotópico de la Segunda Campaña

Cód. Lab	Identificación	$\delta \text{‰}^2\text{H}$	$\delta \text{‰}^{18}\text{O}$
M1	Vertiente Ojos de Opache	-53.5	-7.41
M2	Río Loa en Finca	-51.2	-6.68
M3	Río San Salvador	-62.2	-7.52
M4	Loa en Escorial	-54.2	-7.32
M5	Loa en Angostura	-57.3	-7.89
M6	Pozo 5 MET	-63.2	-8.50
M7	Pozo 3 MET	-62.4	-8.15
M8	Pozo 21 MET	-54.3	-7.04
M9	Pozo 2 MET	-59.8	-8.85
M10	Salado antes del Loa	-42.3	-7.06
M10A	Río Loa antes de Salado	-56.6	-8.16
M10B	Río Loa después Junta con Salado	-52.4	-7.25
M11	Pozo Chiu -Chiu	-38.4	-6.27
M12	Vado Santa Barbara(Loa)	-69.0	-9.73
M13	Loa salida embalse Conchi	-61.0	-7.53
M14	Lasana (Loa en..)	-61.4	-8.20
M15	Sal-S7	-57.0	-9.09
M16	Sal -M7	-73.2	-10.4
M17	Manantial 1	-63.9	-9.40
M19	Salado en Ayquina	-48.5	-6.98
M20	Aguas Arriba Caspana (Salado)	-39.0	-5.65
M21	Tatio	-52.8	-7.44
M22	Estación Toconce (Río)	-55.2	-8.44
M23	Manantial Toconce	-47.2	-7.46
M24	Pozo OSPB	-67.6	-8.86
M25	Pozo Turi-2	-45.8	-8.21
M26	Salado antes Curti	-49.3	-6.91
M27	Río Curti antes de Salado	-32.3	-5.14
M27 A	Río Salado después Junta con Curti	-46.2	-6.65
M28	Pozo Cupo 1	-42.3	-8.04

En esta campaña se hizo la misma sectorización que en el monitoreo anterior:

Tabla N°6: grupos de análisis Segunda campaña

Grupo	Nombre grupo	Muestras
1	Pozos Salado	M11-M24-M25-M28
2	Superficial Salado	M15-M19-M20-M22-M26-M27- M27A
3	Vertiente Salado	M16-M17-M21-M23
4	Superficial Loa Alto	M10-M10A-M10B-M12-M13-M14
5	Superficial Loa Medio	M2-M3-M4-M5
6	Pozos Loa Medio (ac. Inferior)	M6-M9
7	Pozos Loa Medio (ac. Superior)	M7-M8
8	Vertiente Loa	M1

7.1.2.1 Análisis de resultados con Diagrammes

A continuación se presenta el Diagrama de Piper con los datos obtenidos en la Segunda campaña

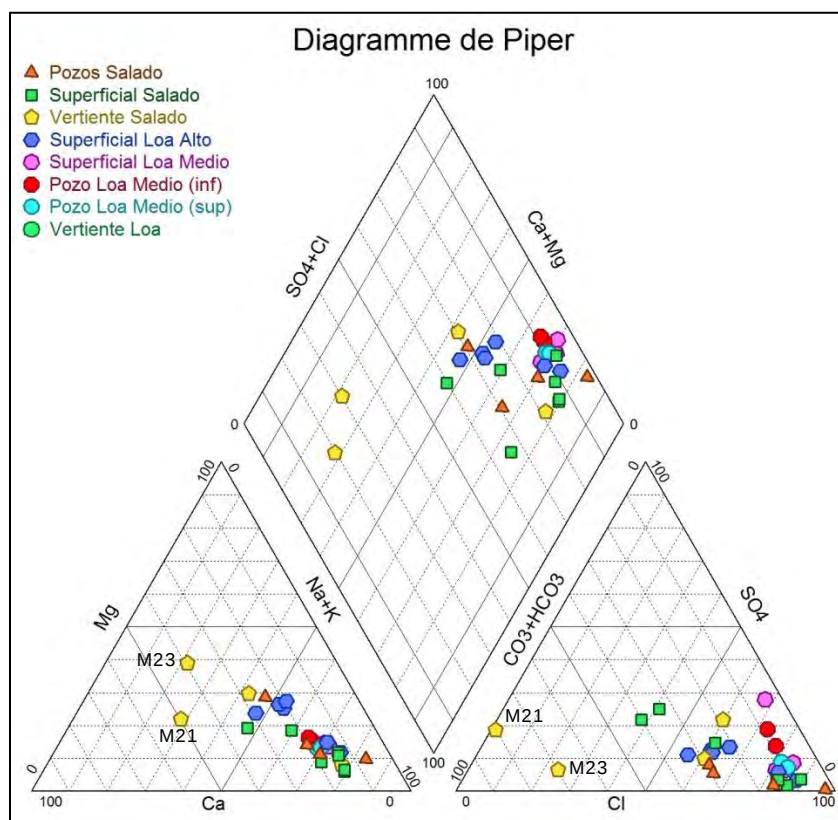


Figura N°14: Resultado Segunda Campaña de Monitoreo

En la **Figura N°11**, se aprecia que las aguas son Cloruradas bicarbonatadas sódicas, y al igual que en la campaña anterior hay dos muestras que escapan de esa clasificación, y son muestras netamente Bicarbonatadas que corresponden a las muestras M21 (Tatio) y M23 (Manantial Toconce) que presentan una tendencia a ser sulfatadas, además son las muestras con CE más baja.

En la siguiente figura se muestran el gráfico de relación entre $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$

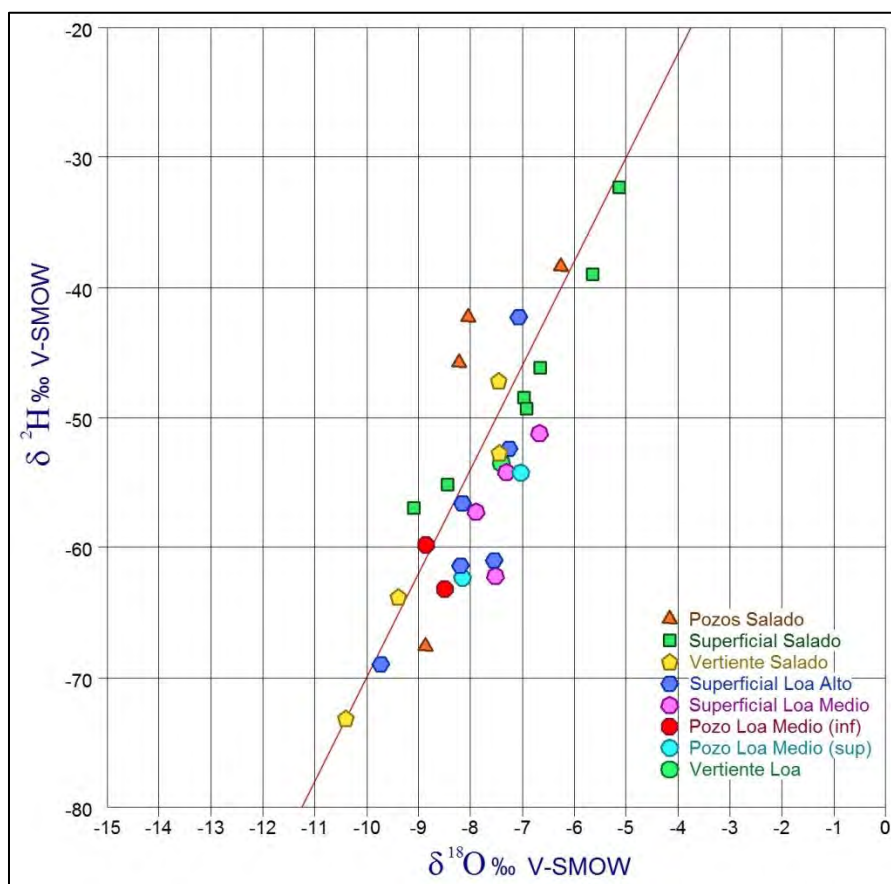


Figura N°15: Relación entre las mediciones de Oxígeno-18 y Deuterio de agua

7.2 Análisis de los resultados

Según las figuras N° 8 y N°11, Diagramas de Piper, las muestras tienen características Cloruradas Sódicas y las del grupo Vertiente Salado son Bicarbonatada-Clorurada-Magnésico-Sódica. Esto se debe a la composición de los estratos existentes. Lamentablemente no se cuenta con información de la construcción de pozos en la cuenca del río Salado.

Según las figuras N°9 y N°12, gráficos de relación Deuterio v/s Oxígeno 18, se puede concluir lo siguiente:

- 1.-No se aprecia una evidente evaporación en las muestras, ya que, están muy cercanas a la LMM,
- 2.- A pesar de estar dentro de una misma zona, la dispersión en la composición de los pozos indica que por diferencias de profundidades, los más dispersos pueden estar recibiendo una recarga de una altura diferente al resto,
- 3.- Según se aprecia, hay 2 posibles tipos de recargas que son las concentraciones más similares (ver **Figura N°16**)

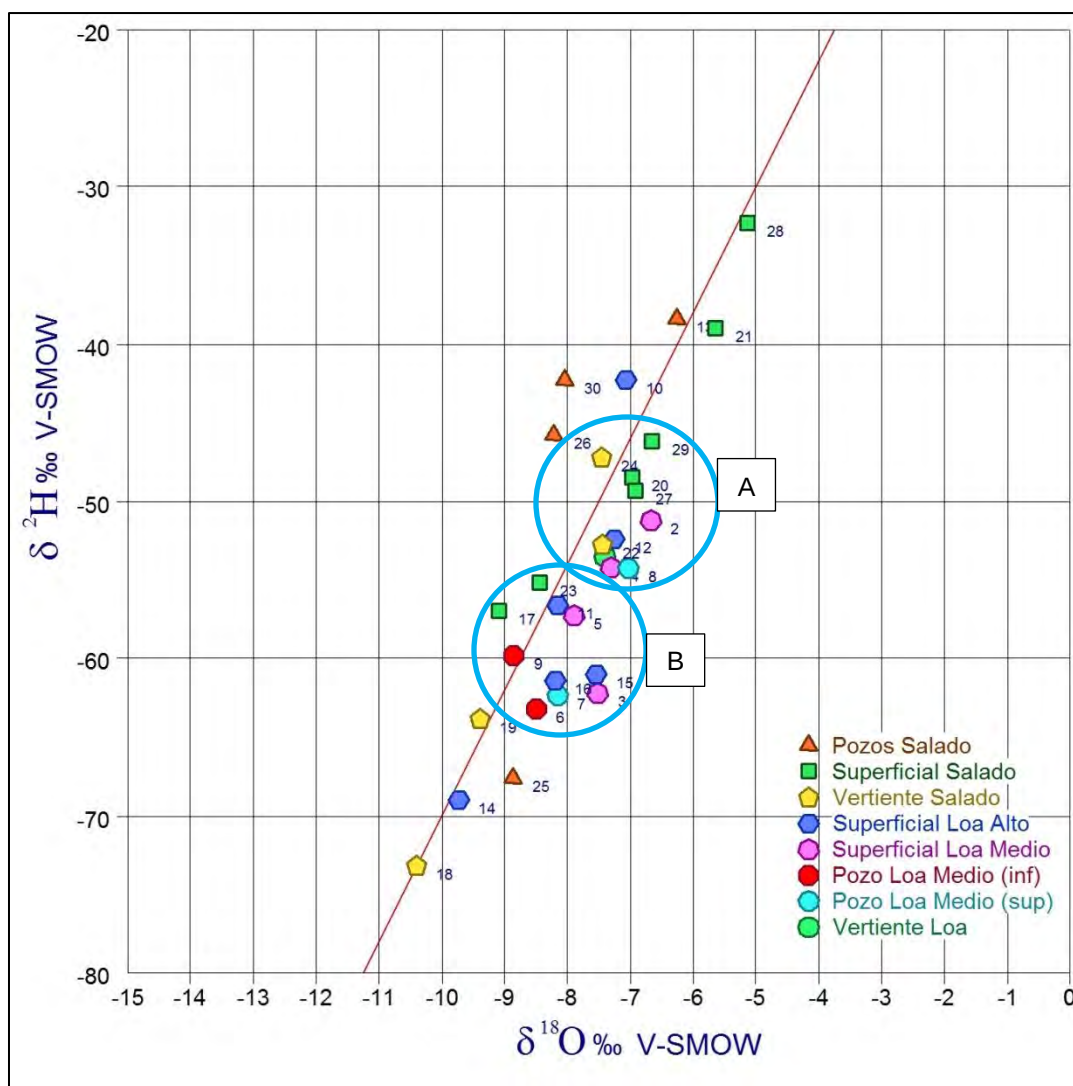


Figura N°16: Relación entre las mediciones de Oxígeno-18 y Deuterio de agua

Según esta agrupación se hace necesario corroborar la ubicación de las muestras en el espacio para relacionarlas con su composición isotópica, por lo que en la siguiente figura se muestra la ubicación de las muestras en los círculos A y B y en la siguiente tabla, su código:

Grupo A	Grupo B
M1	M3
M2	M5
M4	M6
M8	M7
M10-B	M9
M19	M10A
M21	M13
M23	M14
M26	M15
M27-A	M22

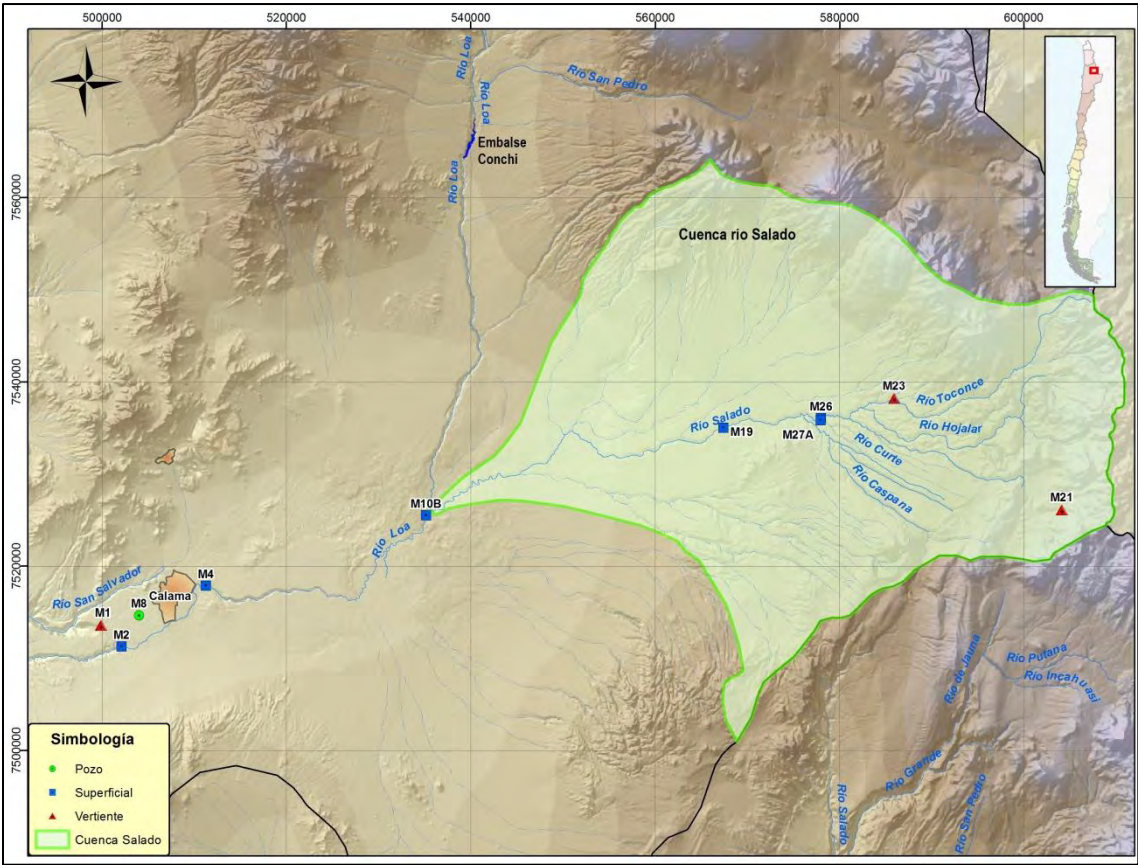


Figura N°17: Muestras con similar composición isotópica (Círculo A)

La figura anterior muestra que las vertientes de la parte alta del Salado mantienen su composición isotópica en los cauces superficiales de la misma cuenca, incluso en la parte media del Loa, sin embargo, la muestra subterránea M8 corresponde a un pozo MET, cuyo origen del agua es el acuífero inferior. Esto hace presumir que la recarga se

produce en la parte alta de la cuenca del Salado y ésta alimenta el acuífero superior en el Loa Medio.

Como se citó anteriormente, el gráfico no muestra la presencia de evaporación, ya que todas las muestras se encuentran muy cercanas a la Línea Meteorica Mundial.

En la siguiente figura se muestra la ubicación de los puntos representados en el "círculo B" de la **Figura N° 16**.

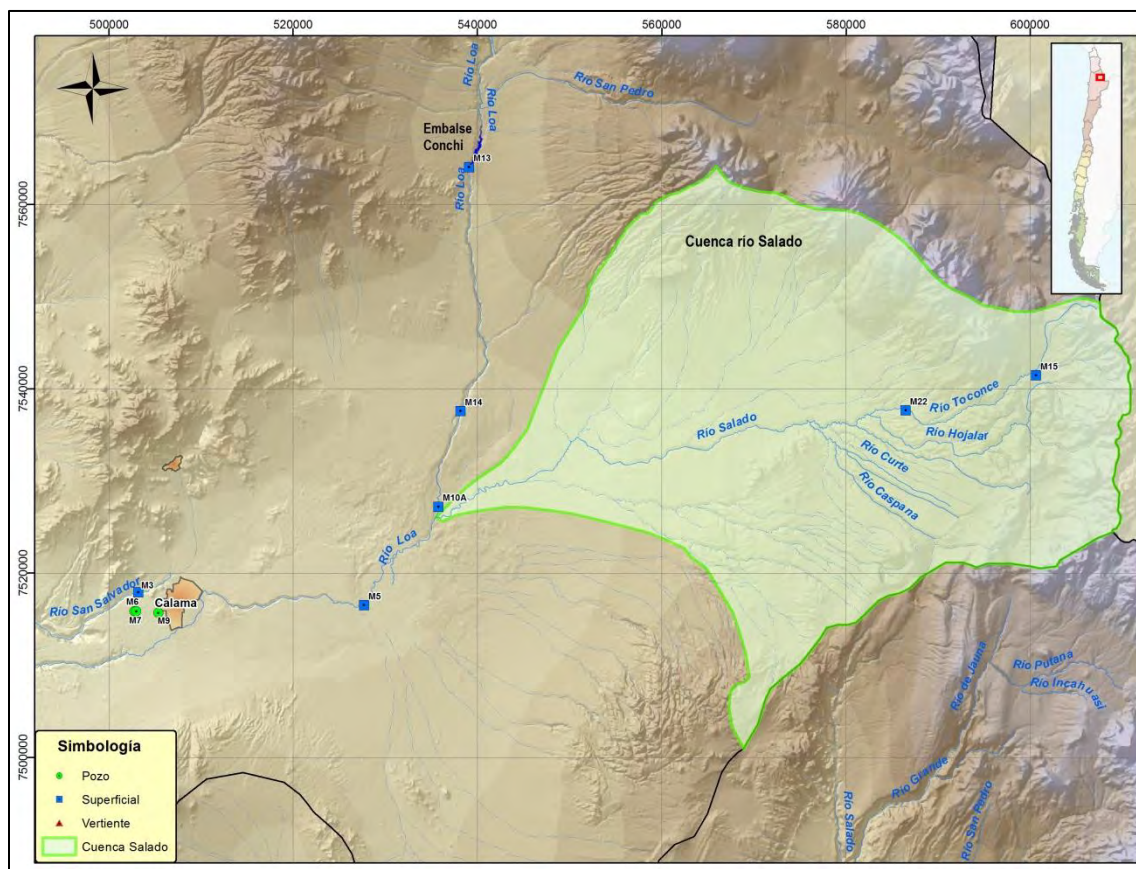


Figura N°18: Muestras con similar composición isotópica (Círculo B)

La **Figura N°18** presenta muestras con un comportamiento diferente al anterior, en este caso, el origen de las aguas proviene de la cuenca del Loa Alto, salvo dos excepciones, en la parte media del Loa, los resultados indican que los pozos MET que extraen agua del acuífero inferior (M6 y M9) presentan la misma huella isotópica que las muestras de las aguas superficiales del Loa Alto, esto hace presumir que estas aguas infiltran en su recorrido y recargan el acuífero inferior en una zona cercana a ChiuChiu

8. CONCLUSIONES

Según la información hidroquímica la mayoría de las muestras tienen una composición Clorurada-Bicarbonatada Sódica. Esto se debe principalmente a que el suelo en el desierto es bastante salino, ya que, la meteorización e intemperismo disgrega los componentes de las rocas q generalmente forman sales.

Según la información isotópica, se aprecian dos marcas de aguas, una corresponde a aguas recargadas en la cuenca del Salado y otra a las aguas provenientes de la cuenca de Loa Alto. Ambas recargan el acuífero del Loa Medio, las primeras al acuífero superior y las segundas al acuífero inferior.

Según la ref. 4 los valores de los análisis isotópicos se han mantenido constantes para los pozos MET incluidos en las campañas de monitoreo I y II, así como en los resultados de dichas campañas.

Cabe señalar que la información aquí presentada, es una primera aproximación para resolver las dudas del origen del agua en los acuíferos de Calama, particularmente de los acuíferos superior e inferior del Loa Medio, que corresponde al sector de mayor explotación en la zona.

Como recomendación se puede citar que es muy importante continuar con la investigación del recurso hídrico en la zona, a través de distintas metodologías y herramientas, como lo son la Geofísica, la construcción de piezómetros de monitoreo, la hidroquímica y la hidrología isotópica.