



DEPTO. CONSERVACIÓN Y
PROTECCIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS
PROCESO N° 12203710

MINUTA: DCPRH N° /19
MAT.: Seguimiento de la calidad del agua subterránea – Pozos APR región de Coquimbo.
SANTIAGO, 31 de julio de 2018

1. Introducción

El año 2016 la Dirección General de Aguas (DGA) realizó un estudio denominado “Diagnóstico de la calidad de las aguas subterráneas de la región de Coquimbo”¹. En este estudio se utilizó la infraestructura instalada de 119 pozos APR para analizar la calidad del agua proveniente del acuífero previo a cualquier tratamiento, representativos de 15 sectores hidrogeológicos de aprovechamiento común (SHAC)². En esa oportunidad destacaron ciertos sectores acuíferos cuya calidad del agua se había visto mermada, ya sea en su potencial uso potable y/o de riego, entregándose como recomendación el realizar un seguimiento. Por esto, la DGA realizó durante el año 2017 un nuevo muestreo de esos sectores acuíferos, considerando 15 pozos, integrándose la nueva información a la previamente obtenida.

2. Objetivos

El objetivo del presente documento es analizar los resultados del seguimiento a la calidad del agua de las fuentes de pozos APR de la región de Coquimbo de las muestras tomadas durante los años 2016 y 2017. Identificar su calidad respecto al uso potable y en riego comparando con las normas NCh 409/05 y NCh 1333/78, y determinar el Índice de calidad general aplicado en el estudio “Diagnóstico de la calidad de las aguas subterráneas de la región de Coquimbo”.

3. Metodología

La metodología de muestreo corresponde a la misma empleada en el “Diagnóstico de la calidad de aguas subterráneas de la región de Coquimbo”.

Respecto al procesamiento de datos, se reúne la información de los análisis fisicoquímicos³ de las fuentes de los pozos APR de los cuales se hizo el seguimiento (Figura 1) y se evalúa la calidad del agua utilizando como criterio el potencial de uso potable del agua, establecido por la NCh 409/05,

¹ Diagnóstico de la calidad de aguas subterráneas de la región de Coquimbo S.D.T. N°397-2017

² Un SHAC es un acuífero o parte de un acuífero, cuyas características hidrológicas espaciales y temporales permiten una delimitación para efectos de su evaluación hidrogeológica o gestión de forma independiente (Dirección General de Aguas, 2013).

³ Las metodologías analíticas, límites de detección de cada técnica y los laboratorios que realizaron los análisis se detallan en la Tabla 6 del Anexo.

y el uso en riego establecido por la NCh 1333/78. La comparación con la NCh 409/05 es sólo referencial pues el uso potable del agua como tal es fiscalizable sólo en la red de distribución, posterior a un tratamiento del agua.

Posterior a este análisis se calcula e interpreta el Índice de calidad general, detallado en la sección Índice de calidad.

Tabla 1. Ubicación de pozos APR donde se realiza el seguimiento de calidad, la cantidad de campañas por cada pozo APR y el sistema de tratamiento si corresponde.

N°	Nombre Pozo	Provincia	Comuna	SHAC	Acuífero	UTM NORTE (WGS84 H19)	UTM ESTE (WGS84 H19)	N° Campañas	Tratam.
1	HUENTELAUQUÉN NORTE (HUENTELAUQUÉN BAJO-HUENTELAUQUÉN ALTO-LA CHIPANA)	Choapa	Canela	Choapa Bajo	Choapa	6503176	259160	2	Filtro Carbono
2	LAS CAÑAS DOS (LAS CAÑAS DOS-CHOAPA)	Choapa	Illapel	Choapa Medio	Choapa	6487249	290753	2	Filtración
3	EL HUACHO	Limarí	Combarbalá	Quebrada Grande	Limarí	6563960	294446	2	Filtración
4	PELÍCANA	Elqui	La Serena	Elqui Medio	Elqui	6680906	306354	2	Sin Información
5	LA CALERA	Elqui	Vicuña	Elqui Medio	Elqui	6680034	308130	2	Sin Información
6	SAN MARCOS (SAN MARCOS NUEVO-SAN MARCOS VIEJO-MAL PASO)	Limarí	Combarbalá	Guatulame	Limarí	6573079	302479	2	Filtración
7	TABALÍ	Limarí	Ovalle	Río Limarí	Limarí	6607735	267418	2	Planta Osmosis
8	LA PALOMA	Limarí	Ovalle	Río Limarí	Limarí	6602882	304565	2	Sin Información
9	PICHASCA (PICHASCA-SAN PEDRO-SAN PEDRO NORTE-EL ESPINAL-LOS NIÑILES)	Limarí	Río Hurtado	Río Hurtado	Limarí	6635671	320495	2	No tiene tratamiento
10	SAN JULIÁN (SAN JULIÁN-CERÓN)	Limarí	Ovalle	Río Limarí	Limarí	6607495	275140	2	Planta Osmosis
11	EL ROMERO (EL ROMERO-SANTA ELISA)	Elqui	La Serena	Santa Gracia	Elqui	6692679	295176	2	No tiene tratamiento
12	CALETA HORNOS	Elqui	Caleta de Hornos	Sin acuífero*	No aplica*	6720223	279422	2	Filtros +Planta de Osmosis
13	CAMARICO (CAMARICO CHICO-CAMARICO VIEJO)	Limarí	Punitaqui	Punitaqui	Limarí	6593733	272616	2	Filtración
14	ALCONES (AGUA DE LA VIDA)	Limarí	Ovalle	Punitaqui	Limarí	6592806	256549	2	Filtro + Osmosis inversa
15	EL TRAPICHE	Limarí	Ovalle	El Ingenio	Limarí	6609502	276965	2	Sin Información

*El pozo está ubicado en un sector sin estudios por la DGA, por tanto no contaría con una delimitación de acuífero ni SHAC.

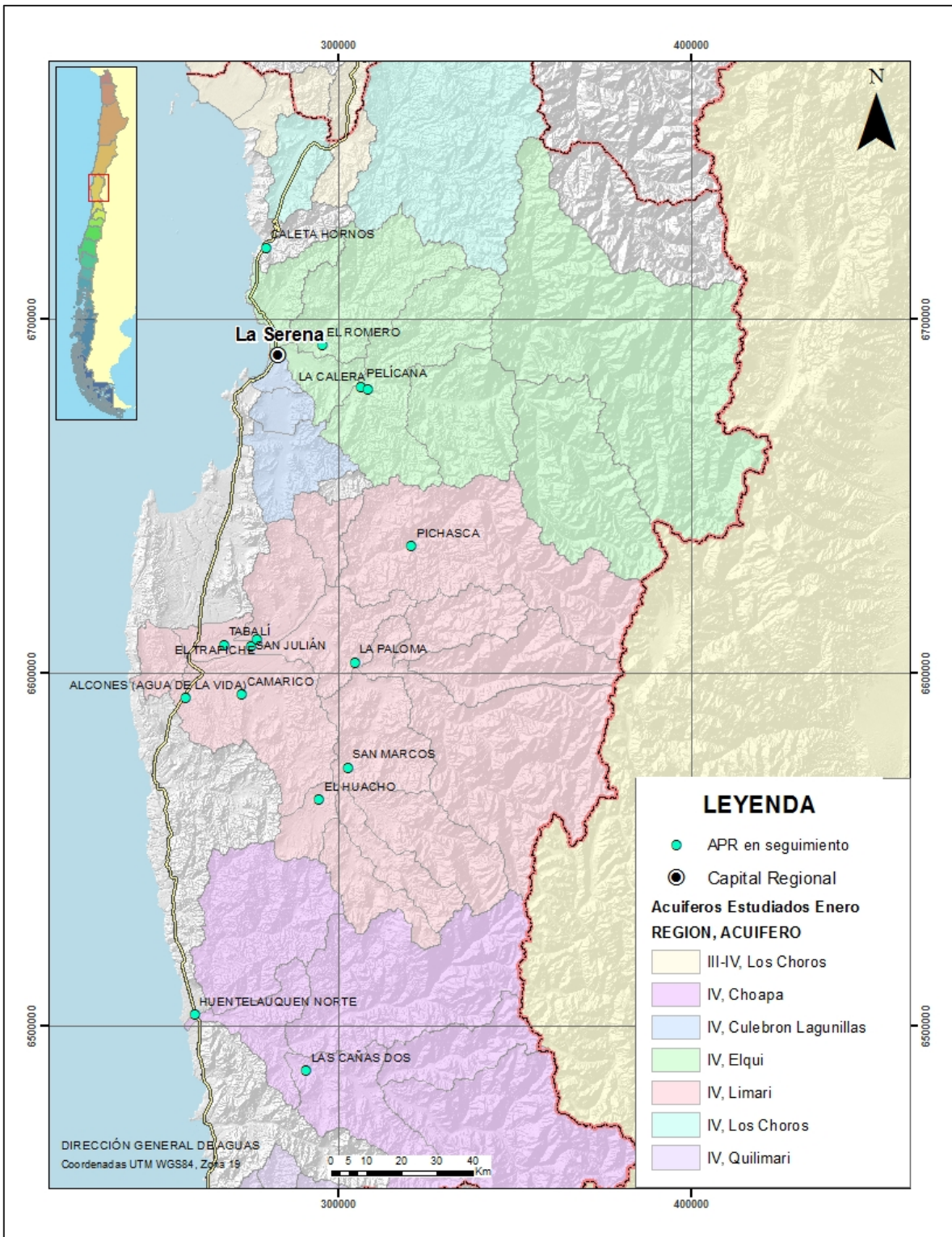


Figura 1. Ubicación de pozos APR en seguimiento de la región de Coquimbo, 2017.

4. Resultados

4.1. Parámetros de terreno

La conductividad eléctrica se caracteriza por ser heterogénea entre los diferentes SHAC, abarcando un rango de valores entre los 271 y 7082 uS/cm. Este rango de valores permitió separar el agua de acuerdo a las distintas limitaciones que indica la NCh 1333/78 respecto a su uso como riego.

En la Tabla 2 se observan dos SHAC donde el agua se caracteriza por presentar una transición entre calidades puesto que el año 2016 no se observan efectos perjudiciales en su uso como riego registrando valores de conductividad menores a 750 uS/cm, mientras que en el año 2017 su calidad disminuye a la de un agua que puede tener efectos perjudiciales en cultivos sensibles. Estos SHAC fueron: Elqui Medio (APR Pelicana 2017) y río Hurtado (APR Pichasca 2017).

Se identificaron SHAC con aguas que alcanzaron conductividades entre los 750 y 1500 uS/cm, atribuyéndole potenciales efectos perjudiciales de ser aplicada en cultivos sensibles. Estos SHAC son Choapa Medio (APR Las Cañas dos 2016 y 2017), Elqui Medio (APR La Calera 2017), Quebrada Grande (APR El Huacho 2016 y 2017), y Santa Gracia (APR El Romero 2016 y 2017) (Tabla 2).

El SHAC río Limarí muestra calidades variables respecto a la conductividad pues se registran valores menores a los 750 uS/cm indicando un agua donde no se observan efectos perjudiciales en su uso (APR La Paloma 2016 y 2017); valores entre 750 y 1500 uS/cm que indican un agua que puede tener efectos perjudiciales en cultivos sensibles (APR San Julián 2016); y valores entre 1500 y 3000 uS/cm siendo esta un agua que puede tener efectos adversos en muchos cultivos y necesita de métodos de manejo cuidadosos (APR Tabalí 2016 y 2017, y APR San Julián 2017) (Tabla 2).

El SHAC El Ingenio (APR El Trapiche 2016 y 2017) y Sin acuífero (APR Caleta Hornos 2017) presentaron la peor calidad en conductividad pues alcanzaron valores de 7082 y 5291 uS/cm respectivamente, indicando que su agua sólo puede ser usada para plantas tolerantes en suelos permeables con métodos de manejo cuidadosos, vale decir, un agua con limitaciones. El SHAC de Punitaqui también posee una de las peores calidades en conductividad respecto a los sectores restantes pues muestra características de un agua que puede tener efectos perjudiciales en cultivos sensibles (APR Camarico 2016 y 2017) con valores entre 1500 y 3000 uS/cm, y se observa además un agua con las mismas limitaciones encontradas en el SHAC Sin acuífero (Tabla 2).

Respecto a los sólidos disueltos totales (SDT) en los SHAC estudiados se logró identificar concentraciones elevadas de este parámetro que puede tener efectos perjudiciales (500 – 1000 mg/L) para cultivos, aguas que pueden tener efectos perjudiciales en cultivos sensibles (1000-2000 mg/L), y aguas que sólo pueden ser usadas para plantas tolerantes en suelos permeables con métodos de manejo cuidadosos (2000-5000 mg/L) (Tabla 2).

Los SHAC donde el agua puede tener efectos perjudiciales son 5: Choapa Medio (APR Las Cañas dos 2016 y 2017), Elqui Medio (APR Pelicana 2016 y 2017, y La Calera 2016 y 2017), río Hurtado

(APR Pichasca 2016 y 2017), y Santa Gracia (APR El Romero 2016 y 2017). Los SHAC donde el agua puede tener efectos perjudiciales en cultivos sensibles son 2: Limarí (APR Tabalí 2016 y 2017) y Punitaqui (APR Alcones 2016 y 2017). Los SHAC donde el uso del agua para riego se restringe para plantas tolerantes en suelos permeables con métodos de manejo cuidadosos son 2: Sin acuífero (APR Caleta Hornos 2016 y 2017) y El Ingenio (APR El Trapiche 2016 y 2017) (Tabla 2).

El SHAC río Limarí posee un agua con diferentes calidades, desde un agua con la cual generalmente no se observarán efectos perjudiciales (≤ 500 mg/L), pasando por un agua que puede tener efectos perjudiciales en cultivos sensibles (entre 500 y 1000 mg/L), hasta un agua que puede tener efectos adversos en muchos cultivos y necesita de métodos de manejo (entre 1000 y 2000 mg/L). En la mejor calidad descrita se encuentra el APR La Paloma (2016 y 2017), en la calidad intermedia descrita se encuentra el APR San Julián (2016), y en la peor calidad descrita se encuentra el APR Tabalí (2016 y 2017) y el APR San Julián nuevamente (2017) (Tabla 2).

El SHAC de Punitaqui presenta una calidad compuesta de forma similar al SHAC Limarí. En lo particular se observa una calidad de agua que puede tener efectos perjudiciales en cultivos sensibles (APR Camarico 2016) y una calidad que puede tener efectos adversos en muchos cultivos y requiere métodos de manejo (APR Alcones 2016 y 2017) (Tabla 2).

Respecto al pH, los valores obtenidos en las campañas del 2016 y 2017 se ubicaron de forma general en rangos neutros (6,5 – 7,8 unidades), registrando valores moderadamente alcalinos en el SHAC Sin acuífero el año 2016 (APR Caleta de Hornos 2016) y en el SHAC Santa Gracia (APR El Romero 2016) (Hounslow, 1995) (Tabla 2). No obstante lo señalado, se observa que en general calidad del agua es adecuada para su uso en riego (NCh 1333/78) y potable (NCh 409/05), sin identificarse cambios abruptos que indiquen una perturbación química.


Finalmente, el Sector Choapa Bajo (APR Huentelauquén Norte), Río Limarí (APR La Paloma) y Guatulame (APR San Marcos), no superaron los límites sugeridos por la NCh 1333/78 para la conductividad, sólidos disueltos totales ni pH, caracterizándola como un agua apta para su uso en riego (Tabla 2).


Los valores de potencial de reducción en los distintos sectores acuíferos indican valores entre 47 y 321 mV, característicos de ambientes más bien oxidantes (Tabla 2). Establecer si el agua posee un carácter oxidante o reductor, sumado al rango de pH permite estimar la especiación (forma química predominante) de un elemento, y con esto su potencial disponibilidad para los organismos vivos (Stumm & Morgan, 1996).


Tabla 2. Resultados de terreno de calidad de agua (conductividad eléctrica, temperatura, pH, potencial de reducción y sólidos disueltos totales) y de los pozos (nivel dinámico y estático del agua, y profundidad del pozo) en los APR en seguimiento de Coquimbo.

N°	Nombre Pozo	Fecha Muestreo	Temp. agua (°C)	Cond.eléct (uS/cm)	SDT (mg/L)	pH (Unidades)	Potencial Redox (mV)	Nivel Dinám. agua (m)	Nivel Estát. agua (m)	Prof. pozo (m)
1	HUENTELAUQUÉN NORTE (HUENTELAUQUÉN BAJO-HUENTELAUQUÉN ALTO-LA CHIPANA)	27-09-2016	16,10	416,0	295	7,20	215	4,0	3,6	8
		14-07-2017	14,47	507,0	349	7,27	118	S.I.	4,55	8
2	LAS CAÑAS DOS (LAS CAÑAS DOS-CHOAPA)	27-09-2016	16,30	936,0	642	7,03	47	2,5	2,2	9,5
		14-07-2017	16,09	1439,0	927	7,33	S.I.	1,84	1,75	9,5
3	EL HUACHO	06-10-2016	26,00	1345,0	1109	6,73	301	4	4	14
		13-07-2017	21,16	886,0	552	7,28	97	S.I.	S.I.	14
4	PELÍCANA	11-10-2016	18,70	735,0	540	7,50	120	16,5	1	30
		12-07-2017	17,51	857,0	561	7,25	137	5,48	1,77	30
5	LA CALERA	18-10-2016	S.I.	S.I.	914	S.I.	S.I.	14,38	3,8	40
		11-07-2017	16,90	1345,0	793	7,13	84,3	15,35	4	40
6	SAN MARCOS (SAN MARCOS NUEVO-SAN MARCOS VIEJO-MAL PASO)	06-10-2016	19,80	285,0	200	6,97	281	4,3	4,15	5
		13-07-2017	18,83	271,0	173	7,32	147	S.I.	4,96	5
7	TABALÍ	13-09-2016	19,40	2828,0	1705	6,93	52	5	2,15	45
		12-07-2017	19,33	2561,0	1426	7,17	S.I.	S.I.	2,15	45
8	LA PALOMA	14-09-2016	18,90	519,0	260	7,08	246	0,95	0,95	25
		12-07-2017	17,71	599,0	333	6,80	108	2,78	2,32	25
9	SAN JULIÁN (SAN JULIÁN-CERÓN)	13-09-2016	18,60	1470,0	992	6,87	S.I.	4,85	S.I.	18
		12-07-2017	18,32	2079,0	1268	6,82	S.I.	2,58	2,26	18
10	PICHASCA (PICHASCA-SAN PEDRO-SAN PEDRO NORTE-EL ESPINAL-LOS NIÑILES)	21-09-2016	20,90	740,0	504	7,07	163	4,85	4,65	20
		12-07-2017	17,71	901,0	505	6,90	220	3,18	3,03	20
11	EL ROMERO (EL ROMERO-SANTA ELISA)	17-10-2016	17,80	1141,0	834	7,85	193	19,9	17,65	100
		12-07-2017	18,42	1322,0	832	7,46	321	S.I.	S.I.	100
12	CALETA HORNOS	12-10-2016	21,50	785,0	5617	7,85	111	7,14	6,94	S.I.
		11-07-2017	17,51	5291,0	3014	7,58	177	8,68	S.I.	40
13	CAMARICO (CAMARICO CHICO-CAMARICO VIEJO)	15-09-2016	20,80	1540,0	882	7,37	S.I.	4,56	2,68	80
		13-07-2017	21,16	1645,0	1049	7,30	S.I.	6,23	2,53	80
14	ALCONES (AGUA DE LA VIDA)	03-11-2016	S.I.	S.I.	1104	S.I.	S.I.	12	12	14,8
		10-07-2017	12,34	3090,0	1894	7,43	183	S.I.	S.I.	17,8
15	EL TRAPICHE	12-09-2016	19,00	3999,0	5179	6,80	48	1,6	S.I.	22
		13-07-2017	12,95	7082,0	4365	7,39	S.I.	2,55	1,94	22

Negrita: Supera valores límites de NCh 409/2005 para uso potable del agua.

: Supera el primer rango recomendado por la NCh 1333/1978 para uso en riego.

: Supera el segundo rango recomendado por la NCh 1333/1978 para uso en riego.

: Supera el tercer rango recomendado por la NCh 1333/1978 para uso en riego.

Negrita: Supera el valor límite de la NCh 409/2005 para uso potable del agua y la NCh 1333/1978 para uso de agua en riego.

S.I.: Sin información de dato.

4.2. Macroelementos

Los macroelementos son aquellos elementos considerados como los más abundantes en la corteza terrestre. El conocimiento de este grupo de elementos permite trazar una línea hacia el o los orígenes del agua analizada, vale decir, su influencia mineralógica (tipo de roca que pudo estar en contacto con el agua), si posee una influencia de la lluvia o del mar, o si presenta alguna influencia antrópica marcada (Postma & Apello, 2013).

Al comparar la composición del agua de cada fuente de APR entre los años monitoreados (2016 al 2017, Figura 2), se observa que la mayoría de estos mantiene un agua sulfatada y/o bicarbonatada, cálcica y/o magnésica (Anexo Figura 5) entre las campañas. Respecto al origen de los aniones, las aguas sulfatadas provienen de lavado de terrenos marinos, oxidación de sulfuros de todo tipo de rocas, concentración en el suelo de aguas de lluvia disolución de yeso, anhidrita y terrenos yesíferos, actividades urbanas, industriales y agrícolas. Por otro lado, las aguas bicarbonatadas provienen de la disolución de CO₂ atmosférico o del suelo, disolución de calizas y dolomitas (ayudado por CO₂ o por ácidos naturales) e hidrólisis de silicatos. Respecto al origen de los cationes, el calcio proviene de la disolución de calizas, dolomitas, yeso y anhidrita, ataque de feldspatos y otros silicatos cálcicos, disolución de cemento calcáreo de muchas rocas, agua de lluvia. Mientras que el magnesio proviene de la disolución de dolomitas y calizas dolomíticas, ataque de silicatos magnésicos y ferromagnésicos, lavado de rocas evaporíticas magnésicas (carnalita), agua de mar, contaminación industrial y minera (Custodio & Llamas, 1976).

Los APR Alcones y Caleta Hornos se alejaron del tipo de agua antes descrito, indicando que sus aguas son más bien cloruradas sódicas, propias de mezclas con agua marina (Custodio & Llamas, 1976), esto debido principalmente a su ubicación cercana al mar (Figura 1). En el caso particular del APR Caleta Hornos las concentraciones de cloruro y sulfato son altas respecto al APR Huentelauquén Norte y Alcones, también ubicados cercanos al mar, indicando esto que la fuente del APR Caleta Hornos podría estar influenciada por intrusión marina.

Se observa que la fuente APR El Trapiche también posee altas concentraciones de cloruro y sodio respecto a las demás fuentes (Tabla 3), no obstante el origen de esta agua no se identificaría principalmente con una influencia marina pues las concentraciones de los demás macroelementos como calcio, potasio y magnesio también son altas.

No se percibe un cambio marcado entre la composición hidroquímica general del agua del año 2016 y 2017, sin embargo se observan que la composición de la fuente del APR Pichasca se desplazó desde la composición sulfatada cálcica hacia la bicarbonatada cálcica (Tabla 3).

Simbología

- Alcones
- Caleta Hornos
- Camarico
- El Huacho
- El Romero
- Huentelauquén Norte
- La Paloma
- Las Cañas Dos
- Pelicana
- Pichasca
- San Julián
- San Marcos
- Tabalí
- La Calera
- El Trapiche

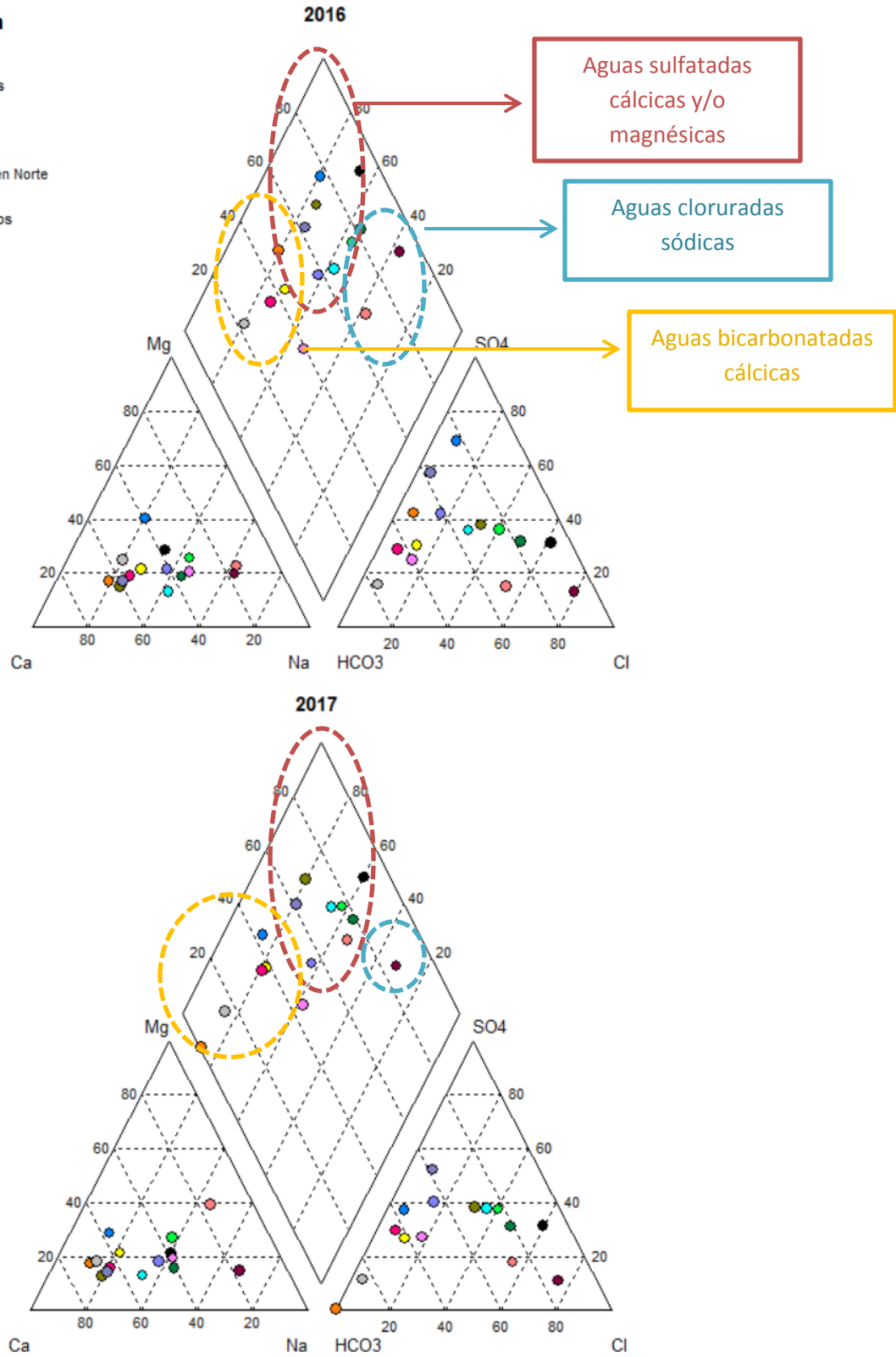


Figura 2. Diagramas de Piper de las campañas realizadas en el año 2016 y 2017 para los APR de región de Coquimbo.

En el sector acuífero Quebrada Grande (APR El Huacho 2016), Sin acuífero (APR Caleta Hornos 2016) y El Ingenio (APR El Trapiche 2016 y 2017) el contenido de sulfato superó el límite referencial para uso potable de agua de la NCh 409/05 (500 mg/L). En cuanto al uso del agua en riego, el límite señalado por la NCh 1333/78 para el sulfato (250 mg/L) fue superado en los sectores Quebrada Grande (APR El Huacho 2016), Río Limarí (APR Tabalí 2016 y 2017, APR San Julián 2016 y 2017), Santa Gracia (APR El Romero 2016 y 2017), Sin acuífero (APR Caleta Hornos 2016 y 2017), Punitaqui (APR Camarico 2016 y 2017, APR Alcones 2017) y El Ingenio (APR El Trapiche 2016 y 2017). Como se percibe de la Tabla 3, en al menos 6 fuentes de APR las superaciones de este parámetro se dieron en ambas campañas, pudiendo representar una tendencia espacial.

El contenido de cloruro en el agua se encontró fuera de los límites sugeridos por la NCh 409/05 en los SHAC Río Limarí (APR Tabalí 2016 y 2017), Sin acuífero (APR Caleta Hornos 2016 y 2017), Punitaqui (APR Alcones 2017) y El Ingenio (APR El Trapiche 2016 y 2017). Respecto a la NCh 1333/78 el contenido de cloruro para uso en riego superó los límites en los SHAC Río Limarí (APR Tabalí 2016 y 2017, APR San Julián 2017), Sin acuífero (APR Caleta Hornos 2016 y 2017), Punitaqui (APR Camarico 2016 y 2017, y APR Alcones 2016 y 2017) y El Ingenio (APR El Trapiche 2016 y 2017) (Tabla 3). De forma similar al caso del sulfato, se considera que concentraciones de cloruro que superaron la recomendación de la NCh 1.333/78 en ambas campañas, ocurriendo esto en 5 fuentes de APR, señalan indicios de alzas, disminuyendo la posibilidad de que representen eventos aislados como podría ser el caso del APR San Julián (Tabla 3).

Respecto al sodio porcentual⁴, los valores calculados señalan que en general de los 11 sectores acuíferos muestreados posee sobre un 35% de sodio, es decir que superan la recomendación de la NCh 1333/78 para uso en riego. Un alto porcentaje de sodio contribuye a la desagregación del suelo, causando problemas de infiltración que pueden repercutir en el rendimiento de los cultivos (Thompson & Troeh, 1988).

Tabla 3. Resultados de macroelementos del agua obtenida de los APR en seguimiento de la región de Coquimbo y su comparación con la NCh 409/05 y NCh 1333/78 (Cl: cloruro, SO4: sulfato; HCO3: Bicarbonato, Na: Sodio, Ca: Calcio, Mg: magnesio, Alc.Total: Alcalinidad total; %Na: sodio porcentual).

N°	Nombre Pozo	Fecha Muestreo	CL (mg/L)	SO4 (mg/L)	HCO3 (mg/L)	Na (mg/L)	K (mg/L)	Ca (mg/L)	Mg (mg/L)	Alc.Total (mg/L)	%Na
1	HUENTELAUQUÉN NORTE (HUENTELAUQUÉN BAJO-HUENTELAUQUÉN ALTO-LA CHIPANA)	27-09-2016	21,0	65,0	151	30	1,7	46,3	12,2	127,0	60
		14-07-2017	21,3	66,4	191	30,37	1,89	70,6	16,77	156,7	51
2	LAS CAÑAS DOS (LAS CAÑAS DOS-CHOAPA)	27-09-2016	54,5	126,0	387	118	2,2	74,9	28,7	318,0	77
		14-07-2017	95,1	200,9	508	164,92	3,29	134,5	41,44	416,5	74
3	EL HUACHO	06-10-2016	47,0	528,4	217	74	2,4	126,9	79,5	178,0	50
		13-07-2017	20,5	170,7	325	31,59	1,10	111,4	34,28	266,5	40
4	PELÍCANA	11-10-2016	14,0	221,5	183	47,2	3	101,2	18,3	150,0	55

⁴ Sodio Porcentual (Na%) = $100 \cdot \frac{Na}{Na+Ca+Mn+K}$; Concentraciones se expresan en miliequivalentes por litro.

N°	Nombre Pozo	Fecha Muestreo	CL (mg/L)	SO4 (mg/L)	HCO3 (mg/L)	Na (mg/L)	K (mg/L)	Ca (mg/L)	Mg (mg/L)	Alc.Total (mg/L)	%Na
		12-07-2017	27,5	218,6	204	45,68	2,94	126,8	17,14	167,6	50
5	LA CALERA	18-10-2016	148	234,8	228	71,2	3,7	159,6	24,7	187	55
		11-07-2017	141,2	237,8	239	65,92	4,58	200,8	23,32	195,7	48
6	SAN MARCOS (SAN MARCOS NUEVO-SAN MARCOS VIEJO-MAL PASO)	06-10-2016	7,0	23,7	142	12,1	1,5	29,5	8	117,0	48
		13-07-2017	4,0	16,3	144,5	9,47	1,62	36,76	6,08	118,6	40
7	TABALÍ	13-09-2016	529,1	457,8	322	328,7	5,7	238,2	74,6	264,0	76
		12-07-2017	440,2	393,8	333	281,07	4,28	225,5	54,87	273,5	75
8	LA PALOMA	14-09-2016	14,0	76,7	211	30,8	2,1	57,4	12,3	173,0	57
		12-07-2017	15,4	89,1	239	31,01	1,69	84,7	13,45	196,1	50
9	SAN JULIÁN (SAN JULIÁN-CERÓN)	13-09-2016	166,8	278,9	339	168	3,9	154,5	28,8	278,0	74
		12-07-2017	276,6	399,0	353	183,41	4,00	251,6	38,48	289,9	67
10	PICHASCA (PICHASCA-SAN PEDRO-SAN PEDRO NORTE-EL ESPINAL-LOS NIÑILES)	21-09-2016	15,0	141,0	216	29,4	1,5	86,1	14,7	177,0	48
		12-07-2017	0,2	1,8	224	30,32	1,01	144,3	22,49	183,5	37
11	EL ROMERO (EL ROMERO-SANTA ELISA)	17-10-2016	74,0	264,3	329	115,3	2,7	109,1	35,5	269,0	70
		12-07-2017	71,8	254,9	350	126,22	3,19	133,8	33,63	287,7	69
12	CALETA HORNOS	12-10-2016	2267,3	523,3	392	1220	23	294,6	205,9	321,0	86
		11-07-2017	1285,9	260,0	413	952,15	16,83	212,2	110,78	338,8	89
13	CAMARICO (CAMARICO CHICO-CAMARICO VIEJO)	15-09-2016	230,0	281,5	229	170,7	3,4	104	53,3	188,0	75
		13-07-2017	232,2	298,2	225	146,48	1,26	121,9	56,08	184,8	70
14	ALCONES (AGUA DE LA VIDA)	03-11-2016	371,0	143,0	378	302,7	8,2	64,3	59,3	310,0	86
		10-07-2017	593,8	264,9	500	431,52	4,01	127,1	198,37	410,0	77
15	EL TRAPICHE	12-09-2016	1529,6	1066,2	312,4	553,0	10,2	547,0	252,0	206,0	66
		13-07-2017	1649,8	1193,5	445	878,30	9,10	743,4	252,81	364,7	72

Negrita: Supera valores límites de NCh 409/2005 para uso potable del agua.

■: Supera valores límite de NCh 1333/1978 para uso en riego.

Negrita: Supera el valor límite de la NCh 409/2005 para uso potable del agua y la NCh 1333/1978 para uso de agua en riego.

4.3. Nutrientes

El nitrato es un compuesto muy soluble, por tanto puede trasladarse grandes distancias (a nivel superficial y a nivel subterráneo) cuando se encuentra disuelto (Wetzel, 2001). Esto representa un problema cuando se quiere contener una contaminación por nitrato, pues el principal aporte de nitratos al medio ambiente es en la utilización de fertilizantes y en los desechos de actividades ganaderas que representan fuentes difusas de contaminación (Wetzel, 2001).

De acuerdo a las concentraciones de nitrato registradas (Tabla 4), se observan que en algunos sectores acuíferos estas presentan un valor mayor en 2017 respecto al 2016. En lo particular en el Sector acuífero Río Hurtado (APR Pichasca) se aumentó un 70%, Santa Gracia (APR El Romero) un 16%, Sin acuífero (APR Caleta Hornos) aumentó un 52% y Punitaqui (APR Alcones) un 47%.

En referencia al uso potable del agua, la NCh 409/2005 establece como límite máximo para el nitrato una concentración de 50 mg/L, sin embargo para identificar cambios en aguas subterráneas atribuibles a una contaminación difusa se consideraron concentraciones de nitrato

mayor a 30 mg/L. Este último umbral fue superado por el SHAC Santa Gracia (APR El Romero 2016 y 2017) y por el Sector Punitaqui (APR Alcones 2017). El SHAC Sin acuífero definido presentó las mayores concentraciones de nitrato en ambos monitoreos, superando las recomendaciones de uso potable del agua (APR Caleta Hornos 2016 y 2017) (Tabla 4).

Al comparar el nivel dinámico y estático del agua respecto a las concentraciones de los distintos nutrientes en 2016 y 2017 no se observa una relación clara para el nitrato, encontrándose las mayores concentraciones distribuidas en distintas profundidades del agua desde la superficie. Respecto del fosfato y amonio tampoco se observó una agrupación particular de las concentraciones con la distancia del agua a la superficie (Tabla 4). No obstante lo descrito, también se debe contemplar la posibilidad de que los valores registrados puedan estar asociados a otros factores, como por ejemplo la distancia al punto de aplicación de fertilizantes más cercano, distancia al cuerpo de agua más cercano que facilite el aporte de este compuesto, geografía del terreno, entre otros factores.

El amonio es un compuesto soluble, cuya fuente principal es la descomposición de los residuos orgánicos urbanos e industriales (Antich, Canals, Soler, Darbishyre, & Spiro, 2000); (Otero, Tolosana-Delgado, Soler, Pawlowsky-Glahn, & Canals, 2005); (Soler, Canals, Goldstein, Otero, Antich, & Spangernber, 2002). Las concentraciones de amonio registradas se muestran más estables el año 2017 respecto al 2016, esto se debe al cambio en el límite de detección del análisis químico⁵ el cual impediría ver una diferenciación de concentraciones entre los pozos como se percibe el año 2016. No obstante esta observación, se percibe que en los SHAC siguientes las concentraciones del año 2017 fueron inferiores a las del año 2016: en un 60% en Quebrada Grande (APR El Huacho), en un 67% y 50% en Elqui Medio (APR Pelicana y APR La Calera, respectivamente), en un 50% en Guatulame (APR San Marcos), en un 44% en Río Limarí (APR San Julián), en un 60% en Santa Gracia (APR El Romero), en un 60% en Sector sin acuífero (APR Caleta Hornos) y en un 71% en el sector Punitaqui (APR Alcones). El resto de los SHAC muestran concentraciones más bien similares entre las campañas.

Como se percibe de la Tabla 4, ninguna fuente de APR registró valores superiores a lo recomendado por la NCh 409/05 en las campañas realizadas (1,5 mg/L)⁶.

Respecto al ortofosfato, cuyas fuentes pueden ser aportes de materia orgánica del suelo, fertilizantes u otras sustancias de origen industrial, se observan SHAC con valores en el 2017 mayores respecto al año 2016, a mencionar: Choapa Medio (APR Las cañas dos) con un 66% más, y Río Limarí (APR Tabalí, APR La Paloma y APR San Julián) con un 80 a 86% más. Esta situación podría ser un evento puntual por no repetirse valores similares el año anterior y por ubicarse en sólo dos SHAC, no obstante, debe mantenerse como referencia ante futuros análisis.

⁵ El cambio en el límite de detección se debe a que la licitación para los análisis del año 2017 se la adjudicó otro laboratorio diferente al del año 2016, el cual al menos en amonio presentaba un límite de detección ligeramente superior al de los análisis del año 2016.

⁶ El valor que señala la NCh 409/05 corresponde al amoniaco, cuya fórmula química es NH_3 . Si bien el compuesto analizado en este estudio es el amonio, cuya fórmula química posee un hidrógeno adicional (NH_4^+), para efectos de comparación se puede asumir que ambas moléculas son equivalentes.

Por otro lado, los sectores acuíferos restantes presentaron valores más bien similares entre campañas y menores respecto a los sectores antes citados, indicando esto que el aporte de este compuesto sería más bien reducido.

Tabla 4. Resultados de nutrientes (NO₃: nitrato, NH₄: amonio y PO₄: ortofosfato) e información sobre el nivel estático y dinámico del agua obtenidos de los APR en seguimiento región de Coquimbo.

N°	Nombre Pozo	Fecha Muestreo	NO ₃ (mg/L)	NH ₄ (mg/L)	PO ₄ (mg/L)	Nivel Dinám. agua (m)	Nivel Estát. agua (m)
1	HUELTAUQUÉN NORTE (HUELTAUQUÉN BAJO-HUELTAUQUÉN ALTO-LA CHIPANA)	27-09-2016	0,22	0,02	0,1	4,0	3,6
		14-07-2017	0,04	<0,02	0,16	S.I.	4,55
2	LAS CAÑAS DOS (LAS CAÑAS DOS-CHOAPA)	27-09-2016	1,57	0,02	0,1	2,5	2,2
		14-07-2017	1,75	<0,02	0,30	1,84	1,75
3	EL HUACHO	06-10-2016	1,63	0,05	<0,1	4	4
		13-07-2017	2,17	<0,02	0,06	S.I.	S.I.
4	PELÍCANA	11-10-2016	4,23	0,06	0,1	16,5	1
		12-07-2017	3,71	<0,02	0,06	5,48	1,77
5	LA CALERA	18-10-2016	12,7	0,04	<0,1	14,38	3,8
		11-07-2017	11,7	<0,02	0,13	15,35	4
6	SAN MARCOS (SAN MARCOS NUEVO-SAN MARCOS VIEJO-MAL PASO)	06-10-2016	0,20	0,04	0,1	4,3	4,15
		13-07-2017	0,27	<0,02	0,18	S.I.	4,96
7	TABALÍ	13-09-2016	1,86	0,015	<0,1	5	2,15
		12-07-2017	11,23	<0,02	0,68	S.I.	2,15
8	LA PALOMA	14-09-2016	0,86	0,015	<0,1	0,95	0,95
		12-07-2017	0,96	<0,02	0,50	2,78	2,32
9	SAN JULIÁN (SAN JULIÁN-CERÓN)	13-09-2016	0,17	0,036	<0,1	4,85	S.I.
		12-07-2017	0,64	<0,02	0,74	2,58	2,26
10	PICHASCA (PICHASCA-SAN PEDRO-SAN PEDRO NORTE-EL ESPINAL-LOS NIÑILES)	21-09-2016	7,18	0,02	<0,1	4,85	4,65
		12-07-2017	24,32	<0,02	0,06	3,18	3,03
11	EL ROMERO (EL ROMERO-SANTA ELISA)	17-10-2016	40,00	0,05	<0,1	19,9	17,65
		12-07-2017	47,66	<0,02	0,06	S.I.	S.I.
12	CALETA HORNOS	12-10-2016	51,9	0,05	0,2	7,14	6,94
		11-07-2017	108,40	<0,02	0,35	8,68	S.I.
13	CAMARICO (CAMARICO CHICO-CAMARICO VIEJO)	15-09-2016	4,30	0,013	<0,1	4,56	2,68
		13-07-2017	4,56	<0,02	0,061	6,23	2,53
14	ALCONES (AGUA DE LA VIDA)	03-11-2016	16,50	0,07	0,4	12	12
		10-07-2017	31,18	<0,02	0,06	S.I.	S.I.
15	EL TRAPICHE	12-09-2016	8,23	0,01	<0,1	1,6	S.I.
		13-07-2017	1,59	<0,02	0,03	2,55	1,94

Negrita: Se encuentra en el límite de alerta de concentración de nitrato en agua potable (30 - 49 mg/L).

Negrita: Supera el valor límite de nitrato de NCh 409/2005 para uso potable del agua (50 mg/L).

S.I.: Sin información

4.4. Microelementos

Los microelementos o elementos minoritarios son requeridos en menor cantidad por los seres vivos. Entre estos se encuentran los elementos traza, metales que usualmente se encuentran en el medioambiente en pequeñas cantidades (Hem, 1992).

Los elementos aluminio, plata, cadmio, cobalto, mercurio, molibdeno y níquel registraron valores bajo el límite de detección en todos los APR monitoreados (Anexo Tabla 5), por tanto se excluyen del análisis.

Respecto de los elementos que registraron al menos un valor sobre el límite de detección, a mencionar: arsénico, cobre, hierro, manganeso, plomo, selenio y zinc, no se aprecia de forma general un aumento (o disminución) en los valores registrados entre el 2016 y 2017.

Al comparar con la NCh 409/05 para uso potable, se observa que respecto al arsénico el sector acuífero Choapa medio (APR Las Cañas dos) registró concentraciones que superan la recomendación (0,01 mg/L) en ambas campañas, mientras que en el sector acuífero Elqui Medio (APR Pelicana) el valor fue superado sólo en 2016. Respecto al hierro la mayoría de los SHAC superaron la concentración de referencia (0,3 mg/L) en al menos una oportunidad, a mencionar: Choapa Medio (APR Las Cañas dos 2017), Elqui Medio (APR Pelicana 2016 y APR La Calera 2016), Guatulame (APR San Marcos 2016 y 2017), Río Limarí (APR Tabalí en 2016 y 2017, La Paloma en 2016 y 2017 y San Julián en 2016), Río Hurtado (APR Pichasca 2016), Punitaqui (APR Camarico 2016 y 2017, y APR Alcones 2016) y El Ingenio (APR El Trapiche 2016 y 2017). Respecto al manganeso los SHAC que superaron los límites sugeridos por la NCh 409/05 (0,1 mg/L) fueron Choapa Bajo (APR Huentelauquén Norte en 2016 y 2017), Choapa Medio (APR Las Cañas dos en 2016 y 2017), Quebrada Grande (APR El Huacho en 2017), Elqui Medio (APR Pelicana en 2016), Guatulame (APR San Marcos en 2016), Río Limarí (APR Tabalí en 2017, APR La Paloma en 2016 y 2017, y APR San Julián en 2016 y 2017), Punitaqui (APR Camarico en 2016 y 2017, y APR Alcones en 2016 y 2017) y El Ingenio (APR El Trapiche 2016 y 2017).

Respecto a la NCh 1333/78, particularmente para su uso en riego, los SHAC Elqui Medio (APR La Calera 2016) y Río Hurtado (APR Pichasca en 2016) superaron el valor sugerido para hierro total (5 mg/L). Respecto al manganeso se observa que en los SHAC Choapa Bajo (APR Huentelauquén Norte en 2016 y 2017), Choapa Medio (APR Las Cañas dos en 2016 y 2017), Elqui Medio (APR Pelicana en 2016), Guatulame (APR San Marcos en 2016), Río Limarí (APR Tabalí en 2017, La Paloma en 2016 y 2017, APR San Julián en 2016 y 2017), en Punitaqui (APR Camarico en 2016 y 2017) y El Ingenio (APR El Trapiche 2016 y 2017) superaron la concentración sugerida (0,2 mg/L).

De acuerdo al análisis realizado se observa que el APR Las Cañas aumentó el año 2017 sus concentraciones de hierro y manganeso (y posiblemente de arsénico) superando las recomendaciones máximas de las normas de referencia, una situación similar se observa para el APR El Trapiche al observarse un aumento pero sólo en las concentraciones de manganeso (Tabla 5). Esta situación amerita el considerar estos pozos dentro de cualquier programa de seguimiento que se establezca para monitorear la calidad del agua subterránea.

Las fuentes APR que cumplen tanto la NCh 409/05 como la NCh 1333/78 respecto a su contenido en metales y metaloides, y que por tanto tienen una mejor calidad para estos usos son los APR El Romero y Caleta de Hornos (Tabla 5).

La descripción de los parámetros de terreno de las muestras de agua analizadas (4.1. Parámetros de terreno) indicaron que en general estas registraron un potencial de reducción positivo indicando un ambiente que favorece las reacciones de oxidación. Al combinar esta información con el valor de pH registrado, que indicó estar en rangos neutros (pH 6,5 -7,8), se observa que el agua tiene características de haber tenido contacto con la atmósfera, es decir con oxígeno (Postma & Apello, 2013). Al sumar al análisis la presencia de metales y metaloides, las condiciones anteriores indicarían que el hierro se encontraría inmovilizado como un hidróxido (formando parte de un sólido o precipitado) o no biodisponible, al igual que el manganeso sólo que éste último formaría parte de un óxido. Una situación similar se presenta en el arsénico, donde si bien podría encontrarse soluble en agua como un compuesto oxidado, la forma presente sería aquella menos lábil y biotóxica. Sin perjuicio de este análisis interpretativo, para conocer la proporción de cada especie que puede formar los elementos analizados se requiere de un análisis detallado de los equilibrios químicos de las muestras, alcance no considerado en este documento.

Tabla 5. Resultados de microelementos en el agua obtenida de la fuente de los APR en seguimiento de la región de Coquimbo (As: Arsénico, Cu: Cobre, Fe: Hierro, Mn: Manganeso, Pb: Plomo, Se: Selenio, Zn: Zinc.).

N°	Nombre Pozo	Fecha Muestreo	As (mg/L)	Cu (mg/L)	Fe (mg/L)	Mn (mg/L)	Pb (mg/L)	Se (mg/L)	Zn (mg/L)
1	HUENTELAUQUÉN NORTE (HUENTELAUQUÉN BAJO-HUENTELAUQUÉN ALTO-LA CHIPANA)	27-09-2016	0,005	<0,01	0,08	0,68	<0,02	<0,001	0,198
		14-07-2017	0,004	<0,01	0,06	0,27	<0,02	<0,001	<0,01
2	LAS CAÑAS DOS (LAS CAÑAS DOS-CHOAPA)	27-09-2016	0,013	<0,01	0,30	0,86	0,02	<0,001	0,288
		14-07-2017	0,012	<0,01	0,63	1,14	<0,02	<0,001	<0,01
3	EL HUACHO	06-10-2016	<0,001	<0,01	0,03	0,01	<0,02	<0,001	0,84
		13-07-2017	0,004	<0,01	0,29	0,12	<0,02	<0,001	0,02
4	PELÍCANA	11-10-2016	0,013	<0,01	2,1	0,36	<0,02	<0,001	0,19
		12-07-2017	0,005	<0,01	0,03	<0,01	<0,02	<0,001	<0,01
5	LA CALERA	18-10-2016	****	<0,01	6,54	0,04	<0,02	<0,001	0,16
		11-07-2017	0,004	<0,01	0,1	<0,01	<0,02	<0,001	0,04
6	SAN MARCOS (SAN MARCOS NUEVO-SAN MARCOS VIEJO-MAL PASO)	06-10-2016	0,002	<0,01	0,40	0,38	<0,02	<0,001	1,02
		13-07-2017	0,002	<0,01	0,79	0,07	<0,02	<0,001	0,03
7	TABALÍ	13-09-2016	<0,001	<0,01	1,19	<0,01	<0,02	<0,001	0,17
		12-07-2017	<0,001	<0,01	1,48	0,34	<0,02	<0,001	0,01
8	LA PALOMA	14-09-2016	<0,001	<0,01	0,77	0,56	<0,02	<0,001	0,42
		12-07-2017	0,001	<0,01	0,97	0,43	<0,02	<0,001	0,33
9	SAN JULIÁN (SAN JULIÁN-CERÓN)	13-09-2016	<0,001	<0,01	3,79	0,27	<0,02	<0,001	0,11
		12-07-2017	0,002	<0,01	0,12	0,34	<0,02	<0,001	0,01

N°	Nombre Pozo	Fecha Muestreo	As (mg/L)	Cu (mg/L)	Fe (mg/L)	Mn (mg/L)	Pb (mg/L)	Se (mg/L)	Zn (mg/L)
10	PICHASCA (PICHASCA-SAN PEDRO-SAN PEDRO NORTE-EL ESPINAL-LOS NIÑILES)	21-09-2016	0,009	<0,01	6,27	<0,01	<0,02	<0,001	0,055
		12-07-2017	0,002	<0,01	<0,02	<0,01	<0,02	<0,001	<0,01
11	EL ROMERO (EL ROMERO-SANTA ELISA)	17-10-2016	0,003	<0,01	0,08	<0,01	<0,02	<0,001	1,15
		12-07-2017	0,003	<0,01	0,04	<0,01	<0,02	<0,001	0,07
12	CALETA HORNOS	12-10-2016	0,002	<0,01	0,29	<0,01	0,03	<0,001	0,19
		11-07-2017	0,002	<0,01	0,11	<0,01	<0,02	<0,001	<0,01
13	CAMARICO (CAMARICO CHICO-CAMARICO VIEJO)	15-09-2016	0,004	<0,01	0,4	0,3	<0,02	<0,001	0,18
		13-07-2017	0,004	<0,01	0,92	0,38	<0,02	<0,001	0,14
14	ALCONES (AGUA DE LA VIDA)	03-11-2016	0,004	0,02	0,35	0,2	<0,02	0,002	0,17
		10-07-2017	0,002	0,03	0,05	0,13	<0,02	0,003	0,03
15	EL TRAPICHE	12-09-2016	<0,001	<0,01	0,94	0,61	<0,02	<0,001	***
		13-07-2017	0,001	<0,01	0,76	1,14	<0,02	<0,001	<0,01

Negrita: Supera valores límites de NCh 409/2005 para uso potable del agua.

■ Supera valores límite de NCh 1333/1978 para uso en riego.

Negrita: Supera el valor límite de la NCh 409/2005 para uso potable del agua y la NCh 1333/1978 para uso de agua en riego.

*** Falla lámpara de Zinc

**** Falla de equipo EAA 1100B

5. Índice de calidad

A continuación se presentan la evolución de la calidad del agua de los APR en seguimiento a través del Índice General de Calidad. Este Índice fue desarrollado en el estudio “Diagnóstico y Clasificación de Acuíferos” (Dirección General de Aguas, 2009) y fue adaptado a la hidroquímica de la región de Coquimbo, encontrando a continuación el detalle de su cálculo.

5.1. Índice de calidad individual por parámetro

El índice de calidad de un pozo, se obtiene mediante la interpolación lineal entre las condiciones límites de cinco clases de calidad (C1, C2, C3, C4 y C5) y los valores de corte (VC1, VC2, VC3, VC4 y VC5), tal como se muestra en la Figura 3 y en la Tabla 6.

Tabla 6. Relación entre clases de calidad y valores de corte.

Índice de calidad (IC)		Valor de corte (VC)	
C1	Excepcional	VC1	Según Indicaciones de OMS respecto a la calidad de agua de uso humano.
C2	Buena	VC2	Norma Chilena con respecto a calidad de aguas.
C3	Regular	VC3	Norma para actividad agrícola, y norma chilena de riego.
C4	Insuficiente	VC4	Puede ser tratada para alcanzar la calidad de agua potable definida por la norma establecida.

C5	Intratable	VC5	Aguas que no se pueden tratar. De ser posibles serían mediante procesos muy costosos o complejos.
-----------	------------	-----	---

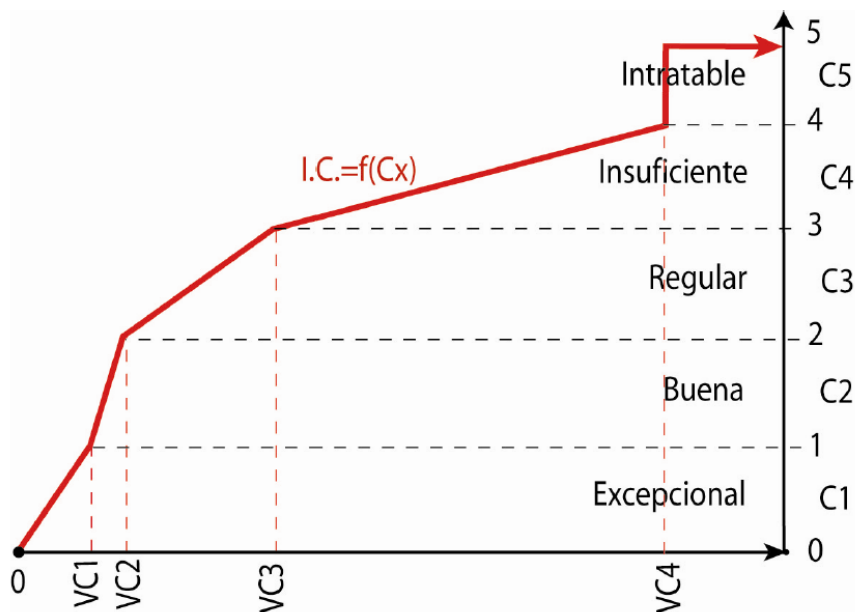


Figura 3. Cálculo de índice de calidad mediante interpolación lineal entre clases⁷.

En el caso de este estudio, los valores de cada clase dependen de los valores de corte mostrados en la Tabla 7 para cada componente químico.

Se incorpora el arsénico al cálculo del índice de calidad como parámetro representativo de la calidad del acuífero. Este metaloide no fue incorporado en el cálculo realizado el año 2016 debido a que los resultados de los análisis se resolvieron posterior a la fecha de publicación del estudio.

Tabla 7. Definición de clases de calidad de agua para cada parámetro.

N°	CLASE	Cloruro	Sulfato	Calcio	Sodio	Magnesio	Nitrato	Arsénico	Hierro	Manganeso	SDT
1	Excepcional	< 250	250	100	200	100	10	0,01	0,3	0,05	1200
2	Buena	400	500	200	200	125	50	0,01	0,3	0,1	1500
3	Regular	1064	961	401	920	250	133	0,10 ⁸	5	0,2	2000
4	Insuficiente	1600	10000	4000	6000	2500	200	4,00	200	40	6000

⁷ Para más detalle se recomienda revisar el Diagnóstico y clasificación de sectores acuíferos (Dirección General de Aguas, 2009)

⁸ El valor de corte 0,10 mg/L de la NCh 1333/78 reemplazó al valor originalmente utilizado en la confección del indicador (2,0 mg/L, FAO) por considerar la norma chilena como más representativa (Dirección General de Aguas, 2009).

N°	CLASE	Cloruro	Sulfato	Calcio	Sodio	Magnesio	Nitrato	Arsénico	Hierro	Manganeso	SDT
5	Intratable	> 1600	> 10000	> 4000	> 6000	> 2500	> 200	> 4,00	>200	>40	>6000

5.2. Cálculo e interpretación del Índice de calidad general

Una vez que se dispone el Índice de calidad (IC) individual de cada parámetro es posible obtener el IC general del APR. Se definió que los criterios para definir el IC general dependieran principalmente de los elementos químicos que, de acuerdo a la norma chilena de agua potable vigente (Instituto Nacional de Normalización), afecten a la salud humana y busquen reflejar que la calidad del acuífero esté definida por el parámetro de peor calidad. Los criterios se presentan en la Tabla 8 y se aplican para cada celda del sector acuífero de acuerdo a la interpolación generada.

Tabla 8: Criterios para establecer el IC general.

Condición IC individual	Resultado IC general	Expresión
Si existe un parámetro con IC Intratable	IC general es Intratable	$Si IC_{individual} > 4$ $IC_{general} = 5$
Si alguno de los parámetros que afectan la salud humana, según NCh409, presentan IC Bueno, Regular o Insuficiente	IC general es el peor IC individual de todos los parámetros	$Si 1 < IC_{individual} \leq 4$ $IC_{general} = Max (IC_{individual})_{i=parámetro}$
Si todos los parámetros que afectan la salud humana, según NCh409, presentan IC Excepcional.	IC general es el promedio del IC individual de todos los parámetros	$Si 1 \geq IC_{individual}$ $IC_{general} = \frac{\sum_{i=parámetro} IC_{individual}}{n^{\circ} parámetros}$

A partir de lo anterior se obtiene un valor para el índice de calidad general en el rango continuo entre 0 y 5. Sin embargo, para efectos de la visualización se utiliza una escala discreta de las cinco clases establecidas. La interpretación de la calidad según el IC general está definida en base a los criterios utilizados para su determinación, es decir, los parámetros que afectan la salud humana

y/o que presenten la peor calidad química. Para mayor información se recomienda revisar el estudio “Diagnóstico y clasificación de sectores acuíferos”, (Dirección General de Aguas, 2009).

Los resultados resumidos en la Tabla 9 indican que la gran mayoría de las fuentes APR ha mantenido una calidad insuficiente durante ambas campañas, situación asociada principalmente al manganeso, a mencionar: Huentelauquén Norte, Las Cañas dos, La Paloma, Pichasca y Camarico. El APR el Huacho ha mantenido una calidad regular del agua pero asociada a sulfato en 2016 y al manganeso en 2017.

Se observa además que la fuente de APR El Trapiche y Tabalí han desmejorado su calidad de Insuficiente a Intratable (asociado al contenido de cloruro), y de Regular a Insuficiente (asociado al manganeso), respectivamente. Por el contrario, las fuentes La Calera, San Marcos, San Julián y Alcones han mejorado su calidad de Insuficiente a Regular, la fuente APR Pelicana mejoró de Insuficiente a Buena, y la fuente APR Caleta Hornos la mejoró de Intratable a Insuficiente.

Por último se observa que la fuente APR El Romero mantuvo una calidad Buena en ambas campañas (Tabla 9).

Tabla 9. Evolución temporal de los Índices de calidad general de aguas de los años 2016 y 2017 en las estaciones de seguimiento de la región de Coquimbo.

N°	Nombre Pozo	2016	2017
		Invierno	Invierno
1	HUENTELAUQUÉN NORTE	Insuficiente	Insuficiente
2	LAS CAÑAS DOS	Insuficiente	Insuficiente
3	EL HUACHO	Regular	Regular
4	PELÍCANA	Insuficiente	Buena
5	LA CALERA	Insuficiente	Regular
6	SAN MARCOS	Insuficiente	Regular
7	TABALÍ	Regular	Insuficiente
8	LA PALOMA	Insuficiente	Insuficiente
9	PICHASCA	Insuficiente	Insuficiente
10	SAN JULIÁN	Insuficiente	Regular
11	EL ROMERO	Buena	Buena
12	CALETA HORNOS	Intratable	Insuficiente
13	CAMARICO	Insuficiente	Insuficiente
14	ALCONES	Insuficiente	Regular
15	EL TRAPICHE	Insuficiente	Intratable

5. Comentarios Finales

Se estableció una caracterización química de las fuentes de los distintos APR a través de la presentación de resultados y comparación con las normativas de calidad de agua vigentes. Sin perjuicio de lo anterior, es necesario aclarar que la comparación con la NCh 409/05 y NCh 1333/78

es sólo referencial y su objetivo es detallar la cantidad de parámetros que no cumplen las recomendaciones.

De las fuentes de los APR en seguimiento, aquellos que presentaron la mayor cantidad de parámetros desviados respecto a una o ambas normativas por más de una campaña fueron los APR Camarico con 7 parámetros (NCh 1333: Conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales, cloruro, sulfato, sodio porcentual y manganeso, y NCh 409: hierro y manganeso), Caleta Hornos con 6 parámetros (NCh 1333: Conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales, cloruro, sulfato, sodio porcentual, y NCh 409: nitrato, cloruro, sólidos disueltos totales), Tabalí con 6 parámetros (NCh 1333: conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales, cloruro, sulfato, sodio porcentual, y NCh 409: cloruro y hierro), El Trapiche con 6 parámetros (NCh 1333: conductividad, sólidos disueltos totales, cloruro, sulfato, sodio porcentual, y NCh 409: sólidos disueltos totales, cloruro y sulfato). El Romero con 5 parámetros (NCh 1333: conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales, sulfato, sodio porcentual, y NCh 409: nitrato), Las Cañas dos con 5 parámetros (NCh 1333: conductividad, sólidos disueltos totales, porcentaje de sodio, manganeso y NCh 409: Arsénico y manganeso) y San Julián con 5 parámetros (NCh 1333: conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales, sulfato, sodio porcentual, y NCh 409: manganeso). Respecto a los APR restantes, se destaca que San Marcos presentó sólo una desviación respecto a las recomendaciones de la NCh 1333/78, identificada como porcentaje de sodio.

Sin perjuicio del análisis anterior, se dio continuidad al cálculo del Índice de calidad general del agua para establecer la evolución de la calidad entre el 2016 y 2017 para el uso más sensible del agua; el consumo humano. Los resultados indican de forma general que la calidad de las fuentes APR se ha mantenido como Insuficiente (Huentelauquen Norte, Las Cañas Dos, La Paloma, Pichasca y Camarico) y Regular (El Huacho), con algunos matices de mantención de Buena Calidad (El Romero), mejora en la calidad (Pelicana, La Calera, Caleta Hornos, San Marcos, San Julián y Alcones) y de empeoramiento de esta (Tabalí y El Trapiche). Las calidades Insuficientes observadas estarían asociadas a las concentraciones de manganeso en la mayoría de los casos. El manganeso y hierro son elementos abundantes en la corteza terrestre, siendo muy frecuente encontrarlos en solución en distintos cuerpos de agua, por tanto se sugiere evaluar el excluirlos en un próximo cálculo del indicador de calidad.

Se identificó una mayor concentración de nitrato en el año 2017 respecto al 2016 en el Sector acuífero Río Hurtado (APR Pichasca), Santa Gracia (APR El Romero), Sin acuífero (APR Caleta Hornos) y Punitaqui (APR Alcones). Si bien estas fuentes de APR no cuentan con suficientes monitoreos aún para identificar una tendencia temporal, se recomienda incluirlas en futuros monitoreos para corroborar o descartar algún problema de contaminación.

De acuerdo a los resultados obtenidos, se recomienda tener en cuenta el origen del parámetro que supera la normativa o que presenta la peor calidad en el Índice general, vale decir, si proviene de una fuente antrópica importante, como nitrato, plomo, mercurio o cadmio, o si por el contrario su fuente predominante es natural, como por ejemplo el arsénico, manganeso, zinc y el hierro

(Mason, 2013) (Wetzel, 2001). Esto permitirá buscar la mejor estrategia para controlarlo en la fuente o mitigarlo antes de que el agua sea consumida.

6. Recomendaciones

- Para los próximos informes de seguimiento es necesario contar con los datos históricos de calidad de agua en la fuente de los APR analizados en este informe, en caso de que estos existan. Esta información viene a nutrir, validar o incluso dar continuidad al análisis de la calidad del agua realizado en este informe, para ellos se solicitara a la DOH Regional si cuenta con estos datos como plazo 60 días corridos una vez tomada conocimiento de este informe.
- Se recomienda a la Dirección Regional recopilar información sobre la profundidad de las cribas de los pozos en seguimiento para así tener claridad de la profundidad a la que se extrae el agua, como plazo 60 días una vez tomada conocimiento de este informe.
- Se recomienda a la Dirección Regional analizar la factibilidad de incorporar todos los pozos del presente informe en el monitoreo de la red rutinaria de calidad de aguas, o en su defecto mantener el seguimiento de aquellos pozos que registraron valores fuera de los límites recomendados por la NCh 1333/78 y NCh 409/05.
- Si la Dirección Regional no puede incorporar estos pozos para seguimiento se recomienda externalizar su monitoreo el próximo año 2019, así mismo se recomienda analizar la calidad del agua en los sectores acuíferos con una menor cantidad de información, como se señala en la Figura 4. Para este fin se entrega una lista tentativa de pozos APR a considerar (Tabla 10). Esta lista contiene un pozo APR por sector acuífero con menos información de calidad de agua. Para aquellos sectores acuíferos donde no se identificaron pozos APR no se realizaron sugerencias de pozos.

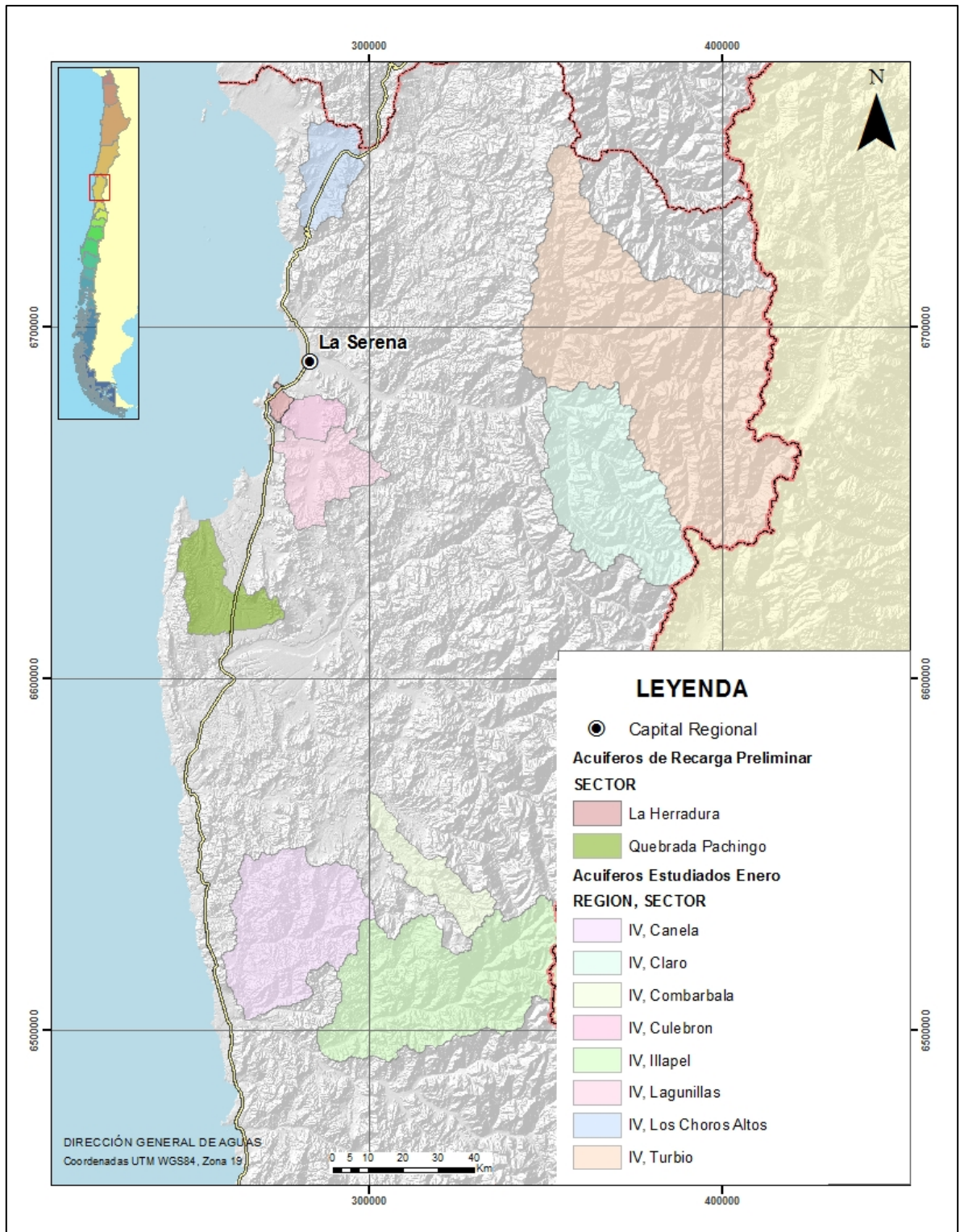


Figura 4. Sectores acuíferos de la región de Coquimbo recomendados para futuros estudios.

Tabla 10. Lista de APR sugeridos en sectores acuíferos con menos información.

N°	Nombre APR	Sector Acuífero	Acuífero	Coordenadas wgs 84, Huso 19	
				Norte	Este
1	La Higuera	Los Choros Altos	Los Choros	6733024	286888
2	Pan de Azúcar	Culebrón	Culebrón Lagunillas	6674425	283028
3	El Sauce	La Herradura	Sin información (Costa)	6678394	275365
4	Santa Virginia	Illapel	Choapa	6507284	325354
5	Valdivia de Punilla-Lorenzo	Quebrada Pachingo	Sin información (Costa)	6613600	254000
6	Cerrillos de Tamaya	Quebrada Pachingo	Sin información (Costa)	6620724	261803
7	Tulahuén (El Macano-La Cisterna-El Cuyano-Mundo Nuevo)	Combarbalá	Limarí	6533358	330222
8	Las Cardas	Lagunillas	Culebrón Lagunillas	6648159	284565
9	Huanta (Guanta)	Turbio	Elqui	6697393	366182
10	Horcón Alcohuz (Horcon-Alcohuz-El Maqui-Los Pinos)	Claro	Elqui	6654575	366188
11	Los Rulos	Canela	Choapa	6541799	286261

DANIELA FREDES MUÑOZ

ANALISTA DE DESARROLLO AMBIENTAL

DEPARTAMENTO DE CONSERVACIÓN Y PROTECCIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS

DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS

DIEGO SAN MIGUEL

JEFA DEL AREA DE DESARROLLO AMBIENTAL

DEPARTAMENTO DE CONSERVACIÓN Y PROTECCIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS

DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS

Bibliografía

Antich, N., Canals, A., Soler, A., Darbishyre, D., & Spiro, B. (2000). The isotope composition of dissolved strontium as tracer of pollution in the Logregat River. *International Association of Hydrological Science*.

Custodio, E., & Llamas, M. (1976). *Hidrología Subterránea* (Vol. 1). Barcelona: Omega.

Dirección General de Aguas. (2009). *Diagnóstico y Clasificación de Sectores Acuíferos*. Recuperado el 30 de julio de 2018, de <http://documentos.dga.cl/CQA5168v1.pdf>

Dirección General de Aguas. (20 de mayo de 2013). *Reglamento sobre normas de exploración y explotación de aguas subterráneas*. Recuperado el 26 de julio de 2018, de http://www.dga.cl/legislacionynormas/normas/Reglamentos/Reglamento_Aguas_Subterranas.pdf

Hem, J. D. (1992). Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water. *U.S. Geological Survey Water-Supply Paper*(2254), 264.

Hounslow, A. (1995). *Water quality data: analysis and interpretation*. Boca Ratón.: Lewis Publishers.

Instituto Nacional de Normalización. (1987). Norma Chilena N°1.333/1978 (Mod.1987). Requisitos de calidad de agua para diferentes usos.

Instituto Nacional de Normalización. (2005). Norma Chilena 409/1 Oficial de 2005, Agua Potable - Parte 1 - Requisitos.

Mason, R. (2013). *Trace Metals in Aquatic Systems*. West Sussex: Wiley-Blackwell Publishing.

Otero, N., Tolosana-Delgado, R., Soler, A., Pawlowsky-Glahn, V., & Canals, A. (2005). Relative vs absolute statistical analysis of compositions: A comparative 194 study of surface waters of a Mediterranean river. *Water Research*, 39(7), 1404-1414.

Postma, C., & Apello, D. (2013). *Geochemistry, groundwater and pollution*. Leiden: AA Balkema Publishers.

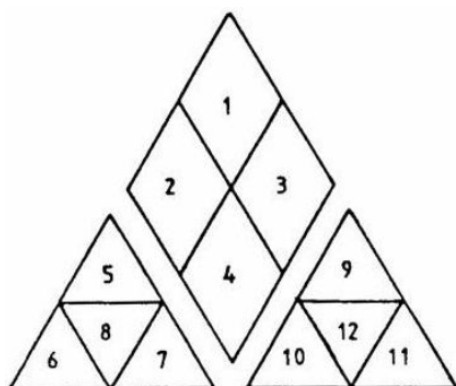
Soler, A., Canals, A., Goldstein, L., Otero, L., Antich, N., & Spangenberg, J. (2002). Sulphur and Strontium isotope composition of the Llobregat River (NE Spain): Tracers of natural and anthropogenic chemicals in stream waters. *Water, Air & Soil Pollution*, 136(1-4), 207-224.

Stumm, W., & Morgan, J. J. (1996). *Aquatic Chemistry: Environmental Science and Technology*. New York: Wiley Interscience.

Thompson, R., & Troeh, F. (1988). *Los Suelos y su fertilidad*. Barcelona: Reverté.

Wetzel, R. (2001). *Limnology: Lake and River Ecosystems*. San Diego: Elsevier.

7. Anexo



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 5. Clasificación de los diversos tipos de agua según el Diagrama de Piper.

Tabla 11. Laboratorios, metodología analítica y límites de detección involucrados en cada análisis realizado a las muestras de APR de la región de Coquimbo.

Parámetros	Campaña	Laboratorio	Metodología	LD
Terreno (Conductividad eléctrica, Temperatura del agua, pH, Potencial redox)	2016	Analab	Nch 411/3 Of. 1996 y 411/11 Of. 2005	-
	2017	SGS		
SDT	2016	Analab	NCh 409 Manual SISS-2007 Método gravimétrico	5
	2017	SGS	SM 2540 C Ed. 22, 2012	
Cl	2016	Analab	ME-28-2007 Método Volumétrico	1
	2017	SGS	SM 4110 B Ed. 22, 2012	0,02
SO4	2016	Analab	ME-30-2007 Método gravimétrico	1
	2017	SGS	SM 4110 B Ed. 22, 2012	0,2
HCO3	2016	Analab	SM 2320 B Ed 22-2012	1
	2017	SGS		2
Na	2016	Analab	SM 3111 B-D Ed 22-2012	0,2
	2017	SGS		0,01
K	2016	Analab	SM 3111 B-D Ed 22-2012	0,2
	2017	SGS		0,01
Ca	2016	Analab	SM 3111 B-D Ed 22-2012	0,4
	2017	SGS		0,01
Mg	2016	Analab	SM 3111 B-D Ed 22-2012	0,1
	2017	SGS		0,01
NO3	2016	Analab	ME-16-2007 Método electrodo específico	0,01
	2017	SGS	SM 4500 NO3 B Ed. 22, 2012	
NH4	2016	Analab	ME-27-2007 Método electrodo específico	0,01
	2017	SGS	SM 4500 NH3 B Ed. 22, 2012	0,02

Parámetros	Campaña	Laboratorio	Metodología	LD
P-PO4	2016	Analab	Hach Method 8048, USEPA approved, SMEWW 21st Edition, Method 4500-PE	0,1
PO4	2017	SGS	SM 3120 B Ed 22-2012	0,02
Alc. Total	2016	Analab	SM 2320 B Ed 22-2012	10
	2017	SGS		2
As	2016	DGA	Método SM 3114B	0,001
	2017			
Cd	2016	DGA	Método SM 3111B	0,01
	2017			
Co	2016	DGA	Método SM 3111B	0,04
	2017			0,02
Cu	2016	DGA	Método SM 3111B	0,01
	2017			
Fe	2016	DGA	Método SM 3111B	0,02
	2017			
Hg	2016	DGA	Método SM 3112B	0,002
	2017			0,001
Mo	2016	DGA	Método SM 3112B	N.S.
	2017			0,05
Mn	2016	DGA	Método SM 3111B	0,01
	2017			
Ni	2016	DGA	Método SM 3111B	0,05
	2017			0,03
Pb	2016	DGA	Método SM 3111B	0,02
	2017			
Se	2016	DGA	Método SM 3114B	0,001
	2017			
Zn	2016	DGA	Método SM 3111B	0,01
	2017			

Tabla 12. Microelementos que registraron valores bajo el límite de detección en todos los APR muestreados de la región de Coquimbo.

N°	Nombre Pozo	Al (mg/L)	Cd (mg/L)	Co (mg/L)	Hg (mg/L)	Mo (mg/L)	Ag (mg/L)
1	HUENTELAUQUÉN NORTE (HUENTELAUQUÉN BAJO-HUENTELAUQUÉN ALTO-LA CHIPANA)	N.S	<0,01	<0,04	<0,002	N.S.	N.S.
		<0,6	<0,01	<0,02	<0,001	<0,05	<0,01
2	LAS CAÑAS DOS (LAS CAÑAS DOS-CHOAPA)	N.S	<0,01	<0,04	<0,002	N.S.	N.S.
		<0,6	<0,01	<0,02	<0,001	<0,05	<0,01
3	EL HUACHO	N.S	<0,01	<0,04	<0,002	N.S.	N.S.

N°	Nombre Pozo	Al (mg/L)	Cd (mg/L)	Co (mg/L)	Hg (mg/L)	Mo (mg/L)	Ag (mg/L)
		<0,6	<0,01	<0,02	<0,001	<0,05	<0,01
4	PELÍCANA	N.S	<0,01	<0,04	<0,002	N.S.	N.S.
		<0,6	<0,01	<0,02	<0,001	<0,05	<0,01
5	LA CALERA	N.S	<0,01	<0,04	<0,002	N.S.	N.S.
		<0,6	<0,01	<0,02	<0,001	<0,05	<0,01
6	SAN MARCOS (SAN MARCOS NUEVO-SAN MARCOS VIEJO-MAL PASO)	N.S	<0,01	<0,04	<0,002	N.S.	N.S.
		<0,6	<0,01	<0,02	<0,001	<0,05	<0,01
7	TABALÍ	N.S	<0,01	<0,04	<0,002	N.S.	N.S.
		<0,6	<0,01	<0,02	<0,001	<0,05	<0,01
8	LA PALOMA	N.S	<0,01	<0,04	<0,002	N.S.	N.S.
		<0,6	<0,01	<0,02	<0,001	<0,05	<0,01
9	SAN JULIÁN (SAN JULIÁN-CERÓN)	N.S	<0,01	<0,04	<0,002	N.S.	N.S.
		<0,6	<0,01	<0,02	<0,001	<0,05	<0,01
10	PICHASCA (PICHASCA-SAN PEDRO-SAN PEDRO NORTE-EL ESPINAL-LOS NIÑILES)	N.S	<0,01	<0,04	<0,002	N.S.	N.S.
		<0,6	<0,01	<0,02	<0,001	<0,05	<0,01
11	EL ROMERO (EL ROMERO-SANTA ELISA)	N.S	<0,01	<0,04	<0,002	N.S.	N.S.
		<0,6	<0,01	<0,02	<0,001	<0,05	<0,01
12	CALETA HORNOS	N.S	<0,01	<0,04	<0,002	N.S.	N.S.
		<0,6	<0,01	<0,02	<0,001	<0,05	<0,01
13	CAMARICO (CAMARICO CHICO-CAMARICO VIEJO)	N.S	<0,01	<0,04	<0,002	N.S.	N.S.
		<0,6	<0,01	<0,02	<0,001	<0,05	<0,01
14	ALCONES (AGUA DE LA VIDA)	N.S	<0,01	<0,04	<0,002	N.S.	N.S.
		<0,6	<0,01	<0,02	<0,001	<0,05	<0,01
15	EL TRAPICHE	N.S	<0,01	<0,04	<0,002	N.S.	N.S.
		<0,6	<0,01	<0,02	<0,001	<0,05	<0,01