

Hidrogeoquímica y comportamiento del agua subterránea en la cuenca del río Claro, Región del Biobío, Chile

Liubow González

María Mardones

Departamento de Ciencias de la Tierra, Universidad de Concepción.
Casilla 3-C, Concepción, Chile. e-mail: liubow@udec.cl

Alberto Silva

Eduardo Campos

RESUMEN

Se presenta un estudio hidrogeoquímico de las aguas subterráneas y superficiales, asociadas a la cuenca hidrográfica del río Claro en el cuadrángulo Yumbel, Región del Biobío, su clasificación y comportamiento. Para tal efecto, se realizaron los análisis químicos a 24 muestras de aguas subterráneas, 3 muestras del sistema fluvial del río Claro y un estudio de la composición granulométrica de 4 muestras de suelo. De acuerdo a los resultados obtenidos, es posible señalar que las aguas analizadas corresponden al tipo genético bicarbonatadas cálcicas y bicarbonatadas magnésicas. Los tipos de agua cálcica y magnésica tienen relación directa con el terreno que atraviesan (terrenos graníticos meteorizados y arenas negras basálticas, respectivamente). Las aguas mixtas cálcico-magnésica y magnésico-cálcica, con contenido más alto de sales totales disueltas, se ubican a lo largo de los límites roca-sedimentos indicando la dirección del flujo subterráneo. El estudio de la composición granulométrica del suelo permite deducir que el área investigada está constituida por material residual, producto de la meteorización de rocas graníticas y por material acumulado de arenas basálticas proveniente del volcán Antuco, debido a lo cual se presentan fuertes variaciones de porosidad eficaz y de permeabilidad, que son características específicas para la infiltración, movimiento y formación de acuíferos controlados por la litología. Del estudio de los análisis químicos de las aguas subterráneas se concluye que son aptas para el consumo y, también, pueden utilizarse en faenas de regadío, sin riesgos de alcalinización y salinización del suelo.

Palabras claves: Hidrogeoquímica, Meteorización, Granulometría, Permeabilidad, Porosidad eficaz, Cuadrángulo Yumbel, Cuenca hidrográfica, Río Claro, Región del Biobío.

ABSTRACT

Hydrogeochemistry and behavior of groundwater in the Río Claro basin, Biobío Region. A hydrogeochemical study of the groundwater and surface water of the Río Claro hydrographic basin of the Yumbel quadrangle (VIII Region, Biobío), including their classification and behaviour is presented. 24 groundwater samples and 3 surface water samples from the río Claro system were chemically analysed. The grain size distribution of 4 soil samples was determined. Based on these results, the waters belong to the calcium bicarbonate and magnesium bicarbonate genetic types. The calcium and magnesium water types are in direct relation to the areas crossed, weathered granite and black basaltic sands, respectively. Mixed calcium-magnesium and magnesium-calcium waters, with high contents of total dissolved solids, were found at the igneous rock-sediment boundary, thus indicating the direction of subterranean flow. Soil granulometry

indicates that the area consists of residual material, product of the weathering of granitic rocks and accumulations of basaltic sands from the Antuco Volcano. This results in strong variations of effective porosity and permeability, which are specific characteristics for infiltration, movement and formation of aquifers controlled by lithology. Chemical analyses of subterranean waters demonstrate them to be apt for consumption, and irrigation without risk of soil alkalisation and salinification.

Key words: Hydrogeochemistry, Weathering, Granulometry, Permeability, Effective porosity, Yumbel quadrangle, Hydrographic basin, Río Claro, Biobío Region.

INTRODUCCION

El área de estudio se extiende entre los 37°00'-37°15'S y los 72°30'-72°45'W (Fig. 1) y corresponde a una zona de contacto entre dos grandes unidades morfoestructurales con características litológicas y estructurales diferentes: el borde oriental de la Cordillera de la Costa y el extremo occidental de la Depresión Intermedia, situada al norte del río Laja. El sector objeto de esta investigación abarca una superficie aproximada de 595 km² y se encuentra en la Zona del Secano Interior.

En el área de estudio, la fuente principal de abastecimiento de agua, tanto en las poblaciones como en las escuelas rurales, corresponde a aguas subterráneas, por lo que es de gran importancia caracterizar hidrogeoquímicamente este recurso.

El objetivo de este estudio es conocer el origen, comportamiento y composición química de las aguas subterráneas y fluviales del sector correspondiente a la Hoja de Yumbel (VIII Región), escala 1:50.000.

Con este fin, se analizaron químicamente 24 muestras de agua subterránea de pozos y 3 muestras del agua fluvial del río Claro (Tabla 1, muestras Nos. 10 y 12) y de un afluente de menor orden jerárquico (Tabla 1, muestra No. 11). También se prospectó el comportamiento geoquímico de las aguas subterráneas pertenecientes al nivel freático y su relación con las aguas superficiales.

La interpretación de los parámetros químicos

mayores se efectuó por métodos gráficos: diagrama de Piper, usando el programa Rockware. El origen y las interacciones agua-terreno, se determinaron por las relaciones hidrogeoquímicas rNa/rCl ; $rCl/rHCO_3$; rMg/rCa . El movimiento y dirección de las aguas subterráneas se determinaron por la concentración de sales totales disueltas (Custodio, 1967; Custodio *et al.*, 1983).

Además, se estudió la composición granulométrica de suelos de cuatro sectores: dos muestras fueron tomadas sobre terrenos graníticos, fuertemente meteorizados, de la Cordillera de la Costa. Otras dos, en la llanura fluviovolcánica de la Depresión Intermedia. Los datos de porosidad eficaz, permeabilidad y clases del terreno, obtenidos de los análisis de la composición granulométrica y de información del Centro de Investigación de Recursos Naturales (CIREN, 1992); fueron interpretados según el triángulo de clasificación de suelos, con líneas de igual porosidad eficaz (Jonson, 1967) y clases de terrenos de Breddin (1963). La infiltración de las aguas fue determinada por el método de balance del cloro (Custodio *et al.*, 1983).

Por último, todas las aguas estudiadas fueron clasificadas según el índice de Scott y SAR (U.S. Salinity Laboratory Staff, 1954), con el fin de verificar si es posible su uso en el regadío, sin que produzca daños al suelo.

MARCO GEOMORFOLOGICO

Chile presenta zonas que se caracterizan por rasgos físicos comunes (Börgel, 1983), lo cual permite definir distintas agrupaciones regionales. Considerando esto, el área de estudio está inserta en la tercera agrupación geomorfológica, denominada Región Central de las Cuencas y del Llano

Fluvio-glaciovolcánico, limitada, en su extremo sur, por el curso del río Biobío.

Al interior de esta región geomorfológica, la cuenca del río Claro se emplaza en la zona de contacto entre el margen oriental de la Cordillera de la Costa y el margen occidental de la Depresión

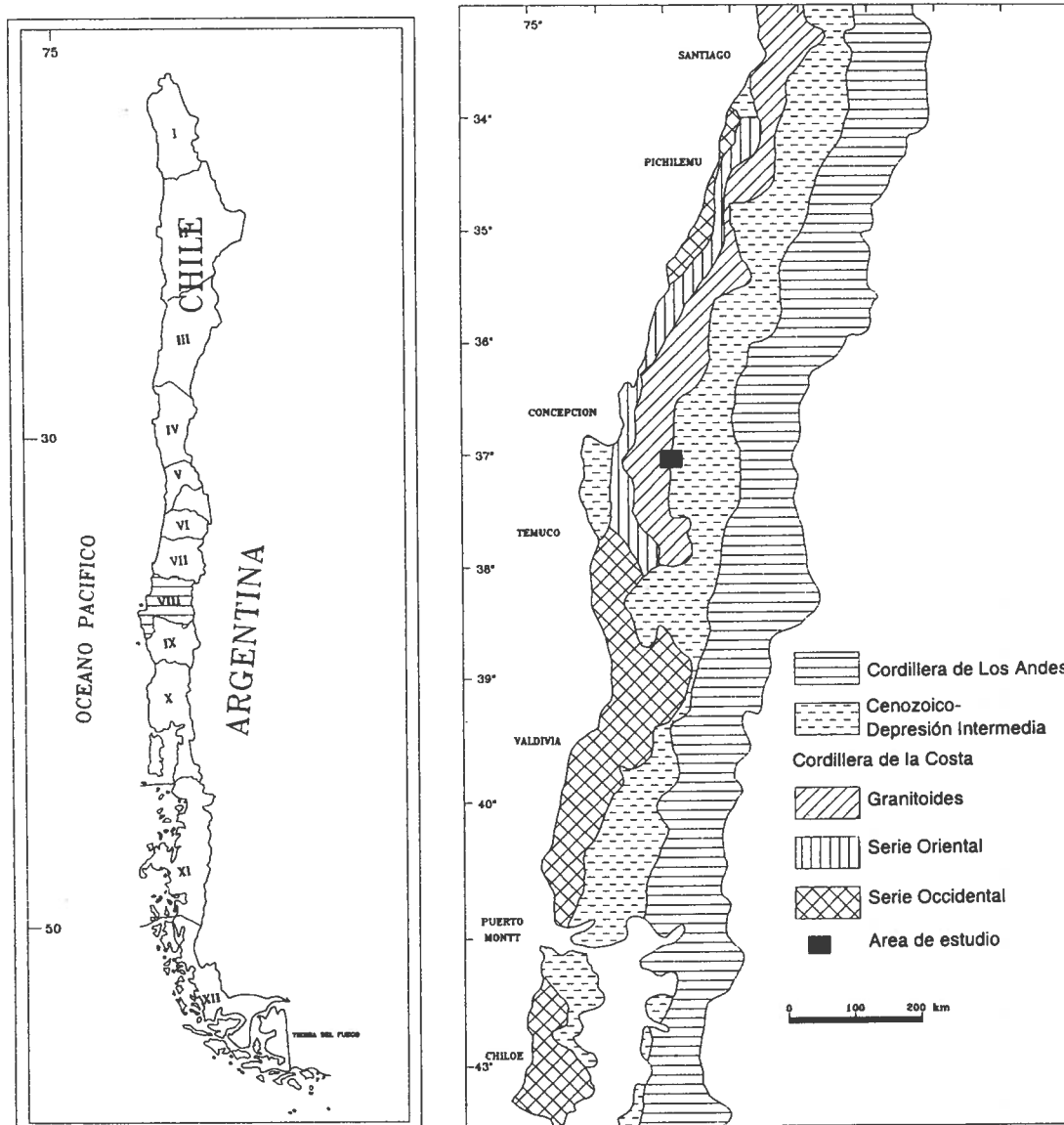


FIG. 1. Mapa de ubicación geográfica del área de estudio y de las unidades geológicas principales.

Intermedia, ambas con características morfológicas y composicionales diferentes (Fig. 2).

La Cordillera de la Costa, unidad orográfica dominante, abarca aproximadamente un 55% del área de estudio. Se extiende en la parte occidental de la Hoja Yumbel (Fig. 2), con altitudes promedio que varían entre los 150 y 300 m s.n.m. Está constituida, principalmente, por rocas plutónicas paleozoicas: granodiorita, granitoide rico en cuarzo, tonalita de biotita-hornblenda, diorita cuarcífera

de biotita-hornblenda y diorita de hornblenda (Bizama, 1998).

Las estructuras principales, fallas y lineamientos (Ferraris, 1981 y Bizama, 1998), muestran direcciones preferenciales NNE-SSW, NNW-SSE y N-S (Fig. 2), las que afectan al Batolito de la Cordillera de la Costa y ejercen un importante control de la red de drenaje, en el área de estudio.

Los intensos procesos de meteorización química, que han actuado sobre las rocas graníticas de

TABLA 1. ANALISIS QUIMICOS Y RELACIONES HIDROGEOQUIMICAS DE LAS AGUAS SUBTERRANEAS DEL RIO CLARO.

Muestras	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	NCh
Cota	240	190	96	145	210	95	99	75	80	62	60	60	112	130	
Nivel (m)	2	2,5	4	1,9	1	5,5	3	1	5,5	rio	rio	rio	2	0,2	
Aniones	meq/l	meq/l	meq/l	meq/l	meq/l	meq/l	meq/l	meq/l	meq/l	meq/l	meq/l	meq/l	meq/l	meq/l	
CO ₃ H	0,96	1,12	2,08	1,04	0,8	2,64	3,37	2,96	2	1,8	2,28	1,6	1,92	1,52	
SO ₄	0,13	0,02	0,02	0,1	0,05	0,09	0,5	0,04	0,32	0,02	0,02	0,02	0,11	0,05	
Cl	0,22	0,15	0,1	0,19	0,19	0,41	0,32	0,18	0,25	0,09	0,19	0,08	0,13	0,51	
Suma	1,31	1,29	2,2	1,33	1,04	3,14	4,19	3,18	2,57	1,91	2,49	1,7	2,16	2,08	
Cationes	meq/l	meq/l	meq/l	meq/l	meq/l	meq/l	meq/l	meq/l	meq/l	meq/l	meq/l	meq/l	meq/l	meq/l	
Na	0,43	0,57	0,44	0,43	0,51	0,66	0,6	0,6	0,5	0,37	0,39	0,31	0,37	0,66	
Ca	0,48	0,6	1,24	0,57	0,36	0,9	1,56	0,67	1	0,49	1,02	0,39	0,92	0,88	
Mg	0,4	0,42	1,21	0,38	0,29	1,7	2,05	2,12	1,09	1,09	1,15	1,01	0,72	0,56	
Suma	1,31	1,59	2,89	1,38	1,16	3,26	4,21	3,39	2,59	1,95	2,56	1,71	2,01	2,1	
pH	7,1	7,1	8,2	6,6	7,2	5,8	6,1	6,2	6,2	8,2	8,1	8,1	7,1	7,1	
Conductividad															
µS/cm	126	140	149	176	108	252	260	250	234	202	203	334	172	236	
STD ppm	130	153	231	147	126	279	318	311	266	321	285	264	218	239	572
Dureza (CaCO ₃)	60	70	130	65	50	165	145	185	125	100	130	95	120	95	
K ppm	0,57	1,54	0,53	2,34	2,92	3,82	3,12	3,5	8,6				0,73	0,46	
Cl ppm	7,8	5,5	3,7	6,8	6,8	14,6	11,4	6,4	9,1	3,4	6,8	2,9	4,8	16,8	250
Fe ppm	0,02	0,08	0,74	0,02	0,1	0,21	0,28	0,25	0,3	1,36	1,07	0,99	0,5	0,09	0,3
NO ₃ ppm	1	0,8	1,5	0,6	2	0,8	2,9	0,6	4,8				0,5	0,5	10
SiO ₂ ppm	32	46	46	42	45	55	66	52	61				52	35	
rMg/rCa	0,8	0,7	1,0	0,7	0,8	1,9	1,3	3,2	1,1	2,2	1,1	2,6	0,8	0,6	
rCl/rCO ₃ H	0,2	0,1	0,0	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,3	
rNa/rCl	2,0	3,8	4,4	2,3	2,7	1,6	1,9	3,3	2,0	4,1	2,1	3,9	2,8	1,3	
ICB	-1,0	-2,8	-3,4	-1,3	-1,7	-0,6	-0,9	-2,3	-1,0	-3,1	-1,1	-2,9	-1,8	-0,3	
SAR	0,61	0,8	0,4	0,63	0,89	0,67	0,45	0,43	0,85	0,42	0,38	0,37	0,41	0,51	<<13
Clase*	C ₁ -S ₁	C ₁ -S ₁	C ₁ -S ₁	C ₁ -S ₁	C ₁ -S ₁	C ₁ -S ₂	C ₁ -S ₂	C ₁ -S ₁	C ₁ -S ₁	C ₁ -S ₁	C ₁ -S ₁	C ₁ -S ₂	C ₁ -S ₁	C ₁ -S ₁	C ₁ -S ₁
Tipos de Agua	Ca-Na	Ca-Na	Ca-Mg	Ca-Na	Na-Ca	Mg-Ca	Mg-Ca	Mg	Mg-Ca	Mg	Mg-Ca	Mg	CaMg	Ca-Na	Ca-Na

(continuación tabla 1)

Muestras	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	NCh
Cota	200	130	84	100	128	90	100	215	90	100	145	84	83	
Nivel	(m)	0,2	2,3	2,5	9,1	5	2	5,5	2,3	4	2,5	0,2	8	5
Aniones	meq/l	1,96	1,6	1,84	2,48	1,68	2,36	2,28	2,16	1,84	1,28	1,8	1,8	
CO ₃ H		0,05	0,06	0,07	0,12	0,08	0,12	0,05	0,14	0,08	0,04	0,08	0,1	
SO ₄		0,23	0,13	0,11	0,34	0,19	0,28	0,23	0,17	0,11	0,15	0,09	0,11	
Cl		2,24	2,34	1,79	2,94	1,95	2,76	2,56	2,47	2,03	1,47	1,97	2,01	
Suma	meq/l	0,76	0,4	0,24	0,62	0,34	0,57	0,42	0,48	0,3	0,45	0,4	0,3	
Cationes		0,9	0,6	1,37	1,01	0,38	1,09	1,04	1	0,96	0,66	0,67	0,32	
Na		0,65	0,88	0,52	1,22	1,04	1,19	1,13	1,04	0,79	0,43	0,9	1,41	
Ca		2,31	2,55	1,88	2,85	1,76	2,85	2,59	2,52	2,05	1,54	1,97	2,03	
Mg		7,2	7,5	7,2	6,8	6,7	6,8	6,9	7,1	6,9	6,6	6,9	6,9	
Suma	pH													
Conductividad														
μS/cm	209	232	162	220	287	201	433	250	280	238	129	194	101	
STD ppm	217	269	140	293	312	209	473	273	294	223	142	190	104	572
Dureza (CaCO ₃)	110	120	75	115	155	105	135	130	135	115	80	100	50	
K ppm	0,78	0,47	3,2	2,1	0,93	3,7	3,62	0,86	2,3	0,94	0,6	2,06	1,76	
Cl ppm	8,2	8,6	4,8	3,8	12	6,7	35	8,2	2,4	3,8	5,3	3,4	3,8	250
Fe ppm	0,08	0,11	0,02	0,02	1,98	0,21	0,18	0,24	0,04	0,04	0,1	0,13	0,74	0,3
NO ₃ ppm	0,4	1,8	0,4	3,5	0,8	0,3	8,8	1,6	0,8	1,1	0,5	0,5	0,6	10
SiO ₂ ppm	52,3	33,8	67,5	48	55	62	47	52	57,5	52,5	37	65	55	
Mg/rCa	0,7	1,2	1,5	0,4	1,2	2,7	1,1	1,1	1,0	0,8	0,7	1,3	4,4	
rCl/rCO ₃ H	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	
rNa/rCl	3,3	1,7	3,1	2,2	1,8	1,8	2,0	1,8	2,8	2,7	3,0	4,4	2,7	
ICB	-2,3	-0,7	-2,1	-1,2	-0,8	-0,8	-1,0	-0,8	-1,8	-1,7	-2,0	-3,4	-1,7	<<13
SAR	1,07	0,38	0,22	0,25	0,59	0,4	0,43	0,4	0,42	0,32	0,42	0,45	0,67	
Clase*	C ₁ -S ₁	C ₁ -S ₁	C ₁ -S ₁	C ₁ -S ₁	C ₁ -S ₂	C ₁ -S ₁	C ₁ -S ₂	C ₁ -S ₁	C ₁ -S ₁	C ₁ -S ₁	C ₁ -S ₁	C ₁ -S ₁	C ₁ -S ₁	C ₁ -S ₁
Tipos de Agua	Ca-Na	Mg-Ca	Mg-Ca	Ca	Mg-Ca	Mg	Mg-Ca	Mg-Ca	Mg-Ca	Ca-Mg	Ca-Na	Mg-Ca	Mg	

STD - sales totales disueltas; r - meq/l; ICB - índice de intercambio de base; NCh- Norma Chilena sobre Requisitos para Agua Potable (NCh. 409/1 Of. 84); SAR- Relación de Adsorción del sodio. * según clasificación en U.S. Salinity Laboratory Staff (1954).

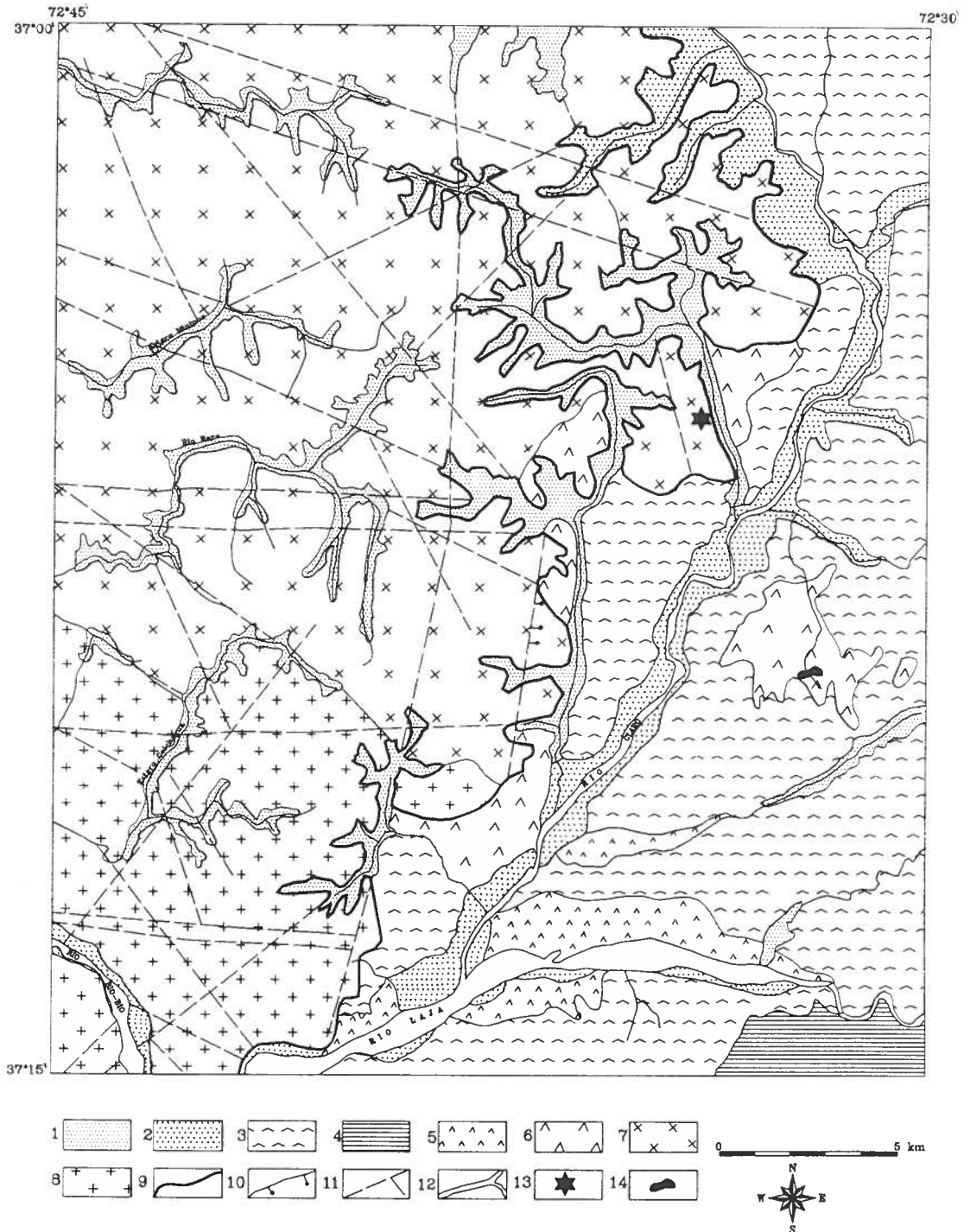


FIG. 2. Marco geológico. **Cuaternario:** 1- sedimentos fluviales, aluviales; 2- terrazas y llanuras fluviales; 3- campos de dunas; 4- áreas de aspersión eólica; 5- terraza fluviovolcánica inferior del Laja; 6- llanura fluviovolcánica media del Laja. **Paleozoico Superior:** 7- cuerpo granodiorítico principal (Pzn unidad Nahuelcura); 8- dioritas cuarcíferas de biotita-hornblenda, dioritas de hornblenda (Pzic, unidad la Canterana); 9- contacto; 10- falla normal; 11- lineamiento; 12- red hidrográfica; 13- ciudad Yumbel; 14- Laguna de Flores.

la Cordillera de la Costa, han permitido la formación *in situ* de un suelo profundo, de espesor variable (CIREN, 1992) compuesto por material arenoso-arcilloso con presencia de gravilla, arcillas y limos. En cierta medida, estos suelos permiten la infiltración y la acumulación local de pequeñas cantidades de agua subterránea, controlada por una topografía de lomajes suaves.

La Depresión Intermedia, comprende la parte oriental de la Hoja Yumbel (Fig. 2), y ocupa aproximadamente un 45% de ésta. Es una llanura fluvial y fluvio-volcánica (sedimentos depositados por flujos fluviales en los cuales el origen de las partículas es volcánico, *i.e.*, los clastos son producto de la erosión de coladas de lavas basálticas) (Börgel, 1982), con altitudes entre los 75 y 100 m s.n.m. Está conformada por material acumulativo del tipo arena de espesor variable entre 4 y más de 25 m. Su permeabilidad, porosidad y una morfología plana, son condiciones favorables para la infiltración del agua pluvial y formación de acuíferos.

Al interior de esta llanura, M. Mardones y F. Peña¹ reconocieron los siguientes tipos de modelados: llanura fluvio-volcánica media del río Laja, terraza fluvio-volcánica inferior del río Laja, campos de dunas y áreas de aspersión eólica. Todos estos relieves están conformados por arenas negras, denominadas por Brügger (1914) como 'las arenas oscuras del valle del Laja' e interpretadas en forma similar por MacPhail (1966). Posteriormente son conocidas por Varela y Moreno (1982) como el 'Abanico Aluvional' del curso medio de los ríos Itata, Laja y Coreo. Según los autores Thiele *et al.* (1998) estas arenas negras que conforman el gran abanico, que rellena y se extiende dentro de la Depresión Intermedia, con su ápice en la salida del piedemonte del valle del Laja, corresponderían a depósitos secundarios del mismo material de Arenas Negras de Trupán-Laja que fue removido y acarreado por los enormes flujos de detritos asociados a la activi-

dad volcánica del volcán Antuco 2. En el llano, la actividad eólica las habría retransportado formando extensos campos de dunas.

A los depósitos fluvio-volcánicos, se le han atribuido edades diferentes: Ilabaca (1979) y Ferraris (1981) señalaron una edad holocena; mientras que Mardones y Jaque (1991) y Amore *et al.* (1992), le atribuyeron una edad pleistocena superior, diferenciando dos tipos de acumulación de composición litológica idéntica: uno de fines de la penúltima glaciación y otro del Tardiglacial. Thiele *et al.* (1998), establecieron que es un depósito más de los muchos que son producto de los continuos episodios volcánicos y sedimentarios, que se sucedieron desde una época de pre-última glaciación.

Dichos depósitos de arenas negras, sobreyacen a una unidad de tobas brechosas y brechas volcánicas consolidadas reconocidas como Formación Banco del Laja (Brügger, 1914), una morrena (Muñoz-Cristi, 1960), un gran lahar (MacPhail, 1966), un depósito de flujo de escorias incandescentes (Varela y Moreno, 1982) o ignimbritas escoriáceas consolidadas de la unidad inferior, o secuencia basal del Cono de Quilleco (Thiele *et al.*, 1998).

A estos depósitos, Ferraris (1981) le asignó la edad pleistocena inferior, MacPhail (1966) pleistoceno superior o tardiglacial, mientras que Thiele *et al.* (1998), por dataciones ¹⁴C, revelan edades pleistocena superior tardía. Sin embargo, supusieron que la secuencia basal del Cono de Quilleco es mucho más antigua, correlacionando estos depósitos con las facies volcanoclásticas y sedimentarias de los Estratos de Malleco (~0,75-0,25 Ma) (Moreno y Varela, 1985) o la Formación Malleco. Por otra parte, Emparan *et al.*, 1992 sugirieron que no es finiglacial. Los depósitos no consolidados de arenas negras se caracterizan por una buena permeabilidad, que es un factor fundamental para la infiltración de aguas lluvia y formación de acuíferos.

FUNCIONAMIENTO DEL ACUIFERO

El potencial hidráulico, la permeabilidad y las características geomorfológicas y litológicas, son los factores más importantes que intervienen en el movimiento natural de las aguas subterráneas en la corteza terrestre.

En el área de estudio, el acuífero se recarga por la infiltración del agua de lluvia, de modo que su régimen se relaciona estrechamente con los montos pluviométricos anuales.

¹1995. Carta geomorfológica de Yumbel (Inédito). Universidad de Concepción, 43 p.

De acuerdo con la constitución del subsuelo y con el funcionamiento geohidrológico, el área puede dividirse en dos sectores: uno localizado en la Cordillera de la Costa y el otro en la Depresión Intermedia.

El Primer Sector se sitúa en la parte norte y occidental del área de la Cordillera de la Costa (Fig. 2), y está constituido por material meteorizado de las rocas graníticas. Según los análisis granulométricos y metodología de Breddin (1963), en este sector predominan dos tipos de materiales de diferente permeabilidad.

El primer tipo de material, ubicado en la parte NNW, está constituido por granulometría muy variable y corresponde a una arena limosa de grano grueso-medio, con $d_{50}=0,25$ mm (Fig. 3, curva granulométrica No. 1) y con una porosidad eficaz media de 15%. Este material, de acuerdo a la clasificación de terrenos de Breddin (1963), pertenece a la clase 4, con una permeabilidad media de hasta 20 m/día ($\approx 0,023$ cm/s) (Fig. 3) y es favorable para la infiltración del agua pluvial, y por ende, la formación de un flujo subterráneo de clase regular.

El segundo tipo de material de este sector, es fino y más uniforme: limo arenoso, con $d_{50}=0,06$ mm (Fig. 3, curva granulométrica No. 2), y con una porosidad eficaz media de 8%. Este material, según clasificación de Breddin (1963), pertenece a la clase 7, con una permeabilidad muy baja, alrededor

de 1 m/día ($\approx 10^{-3}$ cm/s) y es muy pobre para la formación de acuíferos.

Por la ausencia de mediciones directas de escorrentía superficial, evaporación e infiltración, estos parámetros se calcularon según la fórmula empírica de balance de cloro (Custodio *et al.*, 1983).

En este sector, durante las precipitaciones atmosféricas, ocurre una abundante escorrentía superficial, alrededor de 822 mm/a según balance del cloro, lo que ha sido la causa de una intensa erosión pluvial y fluvial. La evaporación media anual, según balance de cloro, es 63,6 mm/a y la infiltración es 27,4 mm/a. De acuerdo a estos datos y a las características hidrogeológicas antes mencionadas, el sector no es apto para la formación de acuíferos productivos, sin embargo, se puede formar flujo subterráneo por infiltración en las zonas fuertemente erosionadas y constituidas por el material tipo uno.

El Segundo Sector, se ubica en la parte oriental y suroriental del área de estudio, en la llanura fluvio-volcánica y fluvial de la Depresión Intermedia. Está constituido por arenas de granos medio y fino de $d_{50}=0,45$ mm y 0,25 mm, respectivamente (Fig. 3, curvas granulométricas Nos. 3 y 4), y con una porosidad eficaz entre 30 y 35%. Este material, según clasificación de terrenos de Breddin (1963), corresponde a la clase 5, con una permeabilidad baja, de alrededor de 10 m/día ($\approx 0,012$ cm/s).

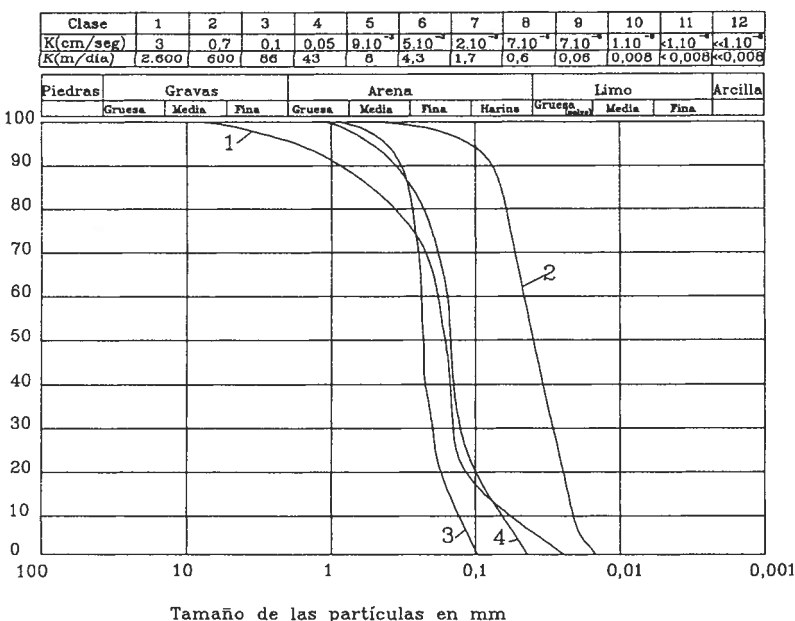


FIG. 3. Relación entre la composición granulométrica y la permeabilidad (según Breddin, 1963). **Curvas granulométricas de:** 1- aluviones de Cordillera de la Costa; 2- rocas graníticas meteorizadas; 3- sedimentos de arena (dunas); 4- sedimentos fluviales.

Según el balance del cloro, la evaporación media anual de este sector es de 475 mm/a, la infiltración de 347 mm/a y la escorrentía superficial es aproximadamente de 91 mm/a. Las características hidrogeológicas y geomorfológicas del terreno, definen que es un sector favorable para la acumulación de agua y formación de acuíferos.

Los niveles estáticos de las aguas subterráneas, medidos en los 24 pozos (Tabla 1), se ubican

a diferentes profundidades. En el primer sector (Cordillera de la Costa), constituido por limo fino y material arenoso, los niveles estáticos se encuentran entre 0,2 y 2 m de profundidad. Los niveles estáticos más profundos, entre 5 y 12 m, son característicos para el segundo sector que es la llanura fluvio-volcánica, compuesta por sedimentos de arenas volcánicas.

CLASIFICACION, COMPOSICION Y CALIDAD DE LAS AGUAS SUBTERRANEAS

La calidad química del agua subterránea está determinada por el tipo y cantidad de sustancias disueltas en la misma. El conocimiento de la composición química y su distribución espacial es importante, tanto desde el punto de vista de la idoneidad para el consumo humano, como por la información que pueden aportar acerca de la dirección y extensión de los sistemas de flujo subterráneo.

La distribución de la composición química de las aguas subterráneas en la zona, en forma de elementos mayores, se presenta en el mapa hidrogeoquímico con diagramas poligonales de Stiff (Fig. 4). Además, las aguas analizadas están representadas en el diagrama de Piper (Fig. 5); en éste, se aprecia que todas las aguas pertenecen al grupo genético bicarbonatado cálcico y magnésico, cuya composición aniónica es fuertemente bicarbonatada. Según la composición catiónica, todas las aguas se subdividen en tres tipos: magnésica, cálcica y mixta en estrecha relación con los tipos de rocas o sedimentos por las cuales circule (Fig. 4). Los tipos de agua cálcico-sódica y sódico-cálcica están relacionados con las rocas plutónicas meteorizadas de la Cordillera de la Costa y el tipo magnésico con los sedimentos de arena basáltica de la Depresión Intermedia, mientras que las aguas mixtas: magnésico-cálcica y cálcico-magnésica se ubican en el contacto entre las rocas y sedimentos.

Las concentraciones de NO_3 y Fe^{+2} en las aguas se encuentran por debajo de los límites máximos permitidos para el consumo humano, con la excepción de las muestras de aguas subterráneas de los pozos Nos. 3, 13 y 19, ubicados en la parte noreste

del área, en las cuales la concentración de hierro supera los límites aceptables por la Norma Chilena sobre Requisitos para agua potable (NCh. 409/1 Of. 84) (Tabla 1).

Lo anterior permite deducir que las aguas subterráneas estudiadas son aptas para el consumo humano, excepto la de los pozos Nos. 3, 13 y 19. Se observa, que la calidad de las aguas del río Claro cumple con los requisitos establecidos por la Norma NCh 133 Of. 78, para riego.

Por su parte, los valores obtenidos de pH, indican que las aguas subterráneas son neutras y pertenecen al tipo oxidante (Hem, 1985); en tanto, las aguas superficiales del río Claro son básicas, con aumento de sales totales disueltas en la dirección aguas abajo.

La determinación del Índice de Scott o coeficiente de álcali: $[K = 662 / (\text{Na}^+ - 0,32 \text{Cl}^- - 0,43 \text{SO}_4^{-2})]$ arrojó un valor superior a 18, lo que implica que todas las aguas estudiadas son aptas para el uso agrícola (Catalán, 1981). Además, según la concentración total de sales solubles (C) y la baja concentración relativa de sodio, con respecto al calcio y al magnesio, expresadas por el índice de relación de absorción de sodio (SAR), con valores entre 0,22 y 1,07 (Tabla 1), todas las aguas del área de estudio pertenecen a dos clases: $\text{C}_1\text{-S}_1$ y $\text{C}_1\text{-S}_2$ con una salinidad baja y conductividad entre 100-250 y 250-750 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Esto señala, que las aguas analizadas (superficiales y subterráneas) son de bastante buena calidad y pueden utilizarse en faenas de regadío, sin peligro de alcalinización y de salinización del suelo.

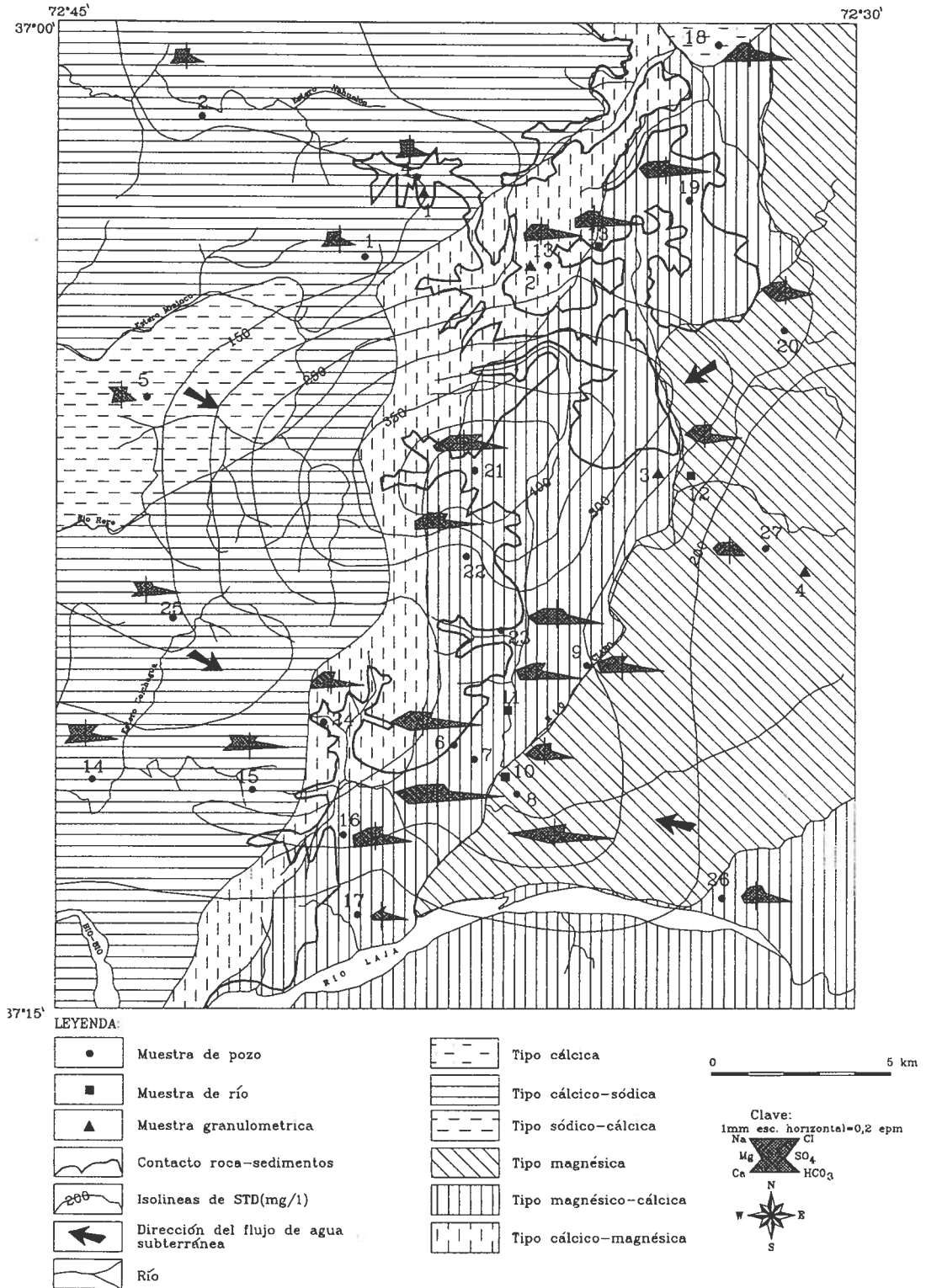


FIG. 4. Mapa hidrogeoquímico con isolíneas de STD (Sólidos Totales Disueltos) y tipos de agua.

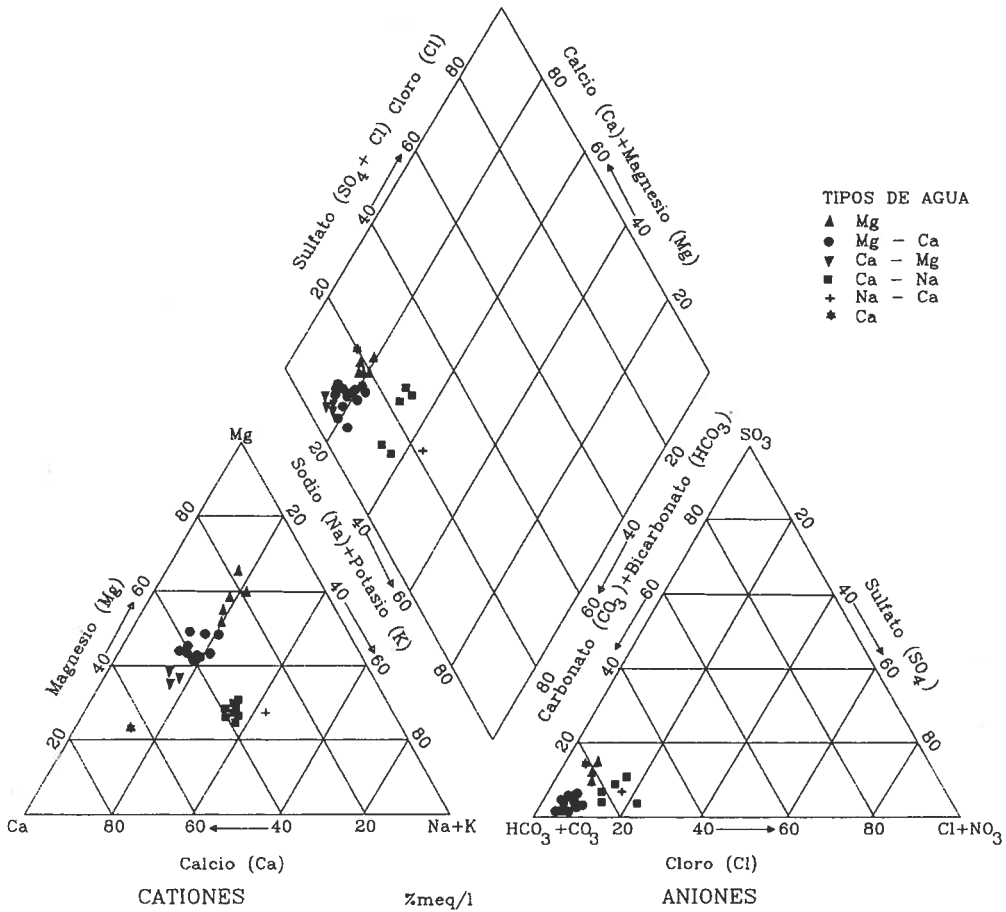


FIG. 5. Diagrama de Piper que resume el carácter químico de las aguas subterráneas y del río Claro.

ORIGEN Y MOVIMIENTO DE LAS AGUAS SUBTERRANEAS

Según las razones rNa/rCl ; rCl/rCO_3H y los índices de intercambio de base (ICB) negativo (Tabla 1), se puede afirmar que la composición química de las aguas es consecuencia de la meteorización de silicatos (Custodio, 1967; Freeze *et al.*, 1979; Hem, 1985).

Además, existen cantidades importantes de sílice (entre 32 y 68 ppm), lo cual es un residuo de la alteración de silicatos y formación de arcillas (Tabla 1).

Con el objeto de visualizar, más claramente, la evolución de las aguas subterráneas, se analizaron distintas relaciones hidrogeoquímicas entre aniones y cationes, presentes en las aguas (Tabla 1). De la relación hidrogeoquímica rMg/rCa , que oscila entre

0,38 y 10, es posible diferenciar claramente dos tipos genéticos de aguas. El primer tipo, con valores rMg/rCa hasta 1, está asociado a los sedimentos originados por la meteorización de las rocas graníticas. El segundo tipo, cuyas razones rMg/rCa son mayores que 1, se relaciona con rocas del tipo gabbro o basalto, que corresponde a la zona de arena basáltica (Custodio, 1967; Custodio *et al.*, 1983; Hem, 1985).

El gradiente hidráulico y la permeabilidad, son los agentes más importantes en el movimiento natural de las aguas subterráneas en la corteza terrestre. Por otra parte, las sales totales disueltas corresponden a la suma de elementos en solución que el agua ha incorporado en su trayecto. Al entrar en

contacto con la superficie terrestre, el agua contiene una determinada cantidad de sales disueltas y, además posee ácido carbónico, que disuelve las sales y minerales que forman las rocas, con lo que incrementa su contenido salino. Este será mayor conforme a que el agua circule por el subsuelo o permanezca un mayor tiempo en contacto con las rocas. La cuantía y el tipo de elementos disueltos dependerá de la composición y solubilidad de éstas.

Los resultados de los análisis de sales totales disueltas (Tabla 1) representados en el plano de

isolíneas (Fig. 4) demuestran que las concentraciones más bajas, menores que 150 ppm, se relacionan con la zona de recarga, y el incremento paulatino de las concentraciones salinas corresponde a la zona de contacto entre las rocas plutónicas meteorizadas de la Cordillera de la Costa y sedimentos fluviovolcánicos de la Depresión Intermedia.

Las variaciones de concentraciones de sales totales disueltas en el agua del área de estudio, indican la dirección del movimiento del flujo subterráneo (Fig. 4).

CONCLUSIONES

El acuífero principal en el área de estudio está relacionado con los sedimentos arenosos fluviovolcánicos y fluviales, ubicados en la Depresión Intermedia, puesto que éste se recarga por infiltración de las aguas lluvia y por la escorrentía subterránea proveniente de la Cordillera de la Costa.

Según análisis químicos y relaciones hidrogeoquímicas, las aguas subterráneas en el área de estudio, se subdividen en dos grupos genéticos: bicarbonatada cálcica y bicarbonatada magnésica. Esta separación se relaciona directamente con las rocas por las cuales éstas circulan.

Las aguas tipo mixto cálcico-magnésica y magnésico-cálcica se ubican en la parte central de la zona de estudio, que corresponde al contacto entre rocas graníticas meteorizadas y sedimentos arenosos fluviovolcánicos. Esto se interpreta como el resultado de una mezcla de dos flujos de composiciones químicas diferentes; uno de composición magnésica, proveniente de la Depresión Intermedia, y otro de composición cálcico-sódica y sódico-cálcica, proveniente de la Cordillera de la Costa.

Hacia al centro del área de estudio, se identifica un aumento gradual del contenido de sales totales disueltas, lo que permite deducir que, en la zona de contacto entre rocas graníticas meteorizadas y sedimentos arenosos fluviovolcánicos, los flujos de agua subterráneas convergen.

La dirección regional de movimiento del agua subterránea en la Depresión Intermedia es este-oeste y su sentido es al oeste; sin embargo, en el área de estudio la Cordillera de la Costa, actúa como una barrera impermeable para la escorrentía subterránea, provocando una condición de estancamiento y un cambio en la dirección y en el sentido hacia el suroeste (Fig. 4). Esto queda evidenciado por el aumento de las concentraciones de STD, registrado en las muestras obtenidas en la zona de contacto entre rocas plutónicas y los sedimentos fluviovolcánicos.

Por último, es importante destacar que la calidad fisicoquímica de las aguas subterráneas cumple con las normas vigentes para el consumo humano, agrícola y ganadero.

AGRADECIMIENTOS

La presente investigación fue posible gracias al financiamiento de la Dirección de Investigación de la Universidad de Concepción, a través del Proyecto Interno 96.025.006-1.0. Los autores expresan su

agradecimiento a B. Keller (ARCADIS) y H. Moreno (Servicio Nacional de Geología y Minería), por su revisión y crítica del manuscrito original.

REFERENCIAS

- Amore, C.; Mardones, M.; Montanari L. 1992. Considerazioni sui depositi di Arenas negras nel bacino idrografico del fiume Biobío (Cile Centrale). *Asociación Gioenia Ciencias Naturales, Boletín*, Vol. 25, No. 339, p. 29-39. Italia.
- Bizama, G. 1998. Geología del Cuadrángulo Yumbel (37°00'-37°5'S, 72°30'-72°45'W) VIII Región del Bío-Bío, Chile. Memoria de Título (Inédito), *Universidad de Concepción*, 103 p.
- Börgel, R. 1983. Geomorfología. In Geografía de Chile. Tomo II. *Instituto Geográfico Militar*, 182 p. Santiago.
- Breddin, H. 1963. Die Grundrißkarten des Hydrogeologischen Kartenweskes der Wasserwirtschaftsverwaltung von Norgrhein-Westfalen. *Geologische Mitteilungen*, Vol. 2, No. 4, p. 393-416. Aachen.
- Brüggen, J. 1914. Los carbones del Valle Longitudinal i la Zona Carbonifera al Sur de Curanilahue, en la provincia de Arauco. *Sociedad Nacional de Minería, Imprenta Barcelona*, 56 p. Santiago.
- Catalán Lafuente, J. 1981. Química del agua. Bellisco. *Librería Editorial*, 414 p. Madrid.
- Centro de Investigación de Recursos Naturales-Corporación de Fomento de la Producción. (CIREN-CHILE). 1992. Descripciones del suelo y símbolos. *Centro de Investigación de Recursos Naturales-Corporación de Fomento de la Producción*, 214 p.
- Custodio, E. 1967. Etudes géohydrochimiques dans le delta du Llobregat (Espagne). *International Association of Scientific Hydrology*, p. 135-155. Barcelona.
- Custodio, E.; Llamas, M.R. 1983. Hidrología subterránea. *Ediciones Omega*, Vol. No. 6, 2350 p. Barcelona .
- Emparan, C.; Suárez, M.; Muñoz, J. 1992. Hoja Curacautín, Regiones de la Araucanía y del Biobío. *Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile*, No. 71, escala 1:250.000.
- Ferraris, F. 1981. Mapas geológicos preliminares de Chile. Hoja Los Angeles-Angol, escala 1:250.000. *Instituto de Investigaciones Geológicas*, 32 p. Santiago.
- Freeze, A.R.; Johan, A. Cherry, J.A. 1979. Groundwater. *Prentice-Hall Inc.*, p. 240-290. Englewood Cliffs, New Jersey 07632, U.S.A.
- Hem, J.D. 1985. Study and interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Waters, *U.S. Geological Survey, Water-Supply Paper*, No. 2254, 263 p.
- Ilabaca, P. 1979. Transgresión marina reciente en el litoral de Concepción: antecedentes morfológicos. In Seminario Taller sobre el Desarrollo e Investigación de los Recursos Marinos de la VIII Región (Gallardo, V.A.; editor). *Universidad de Concepción, Vicerrectoría de Investigación*, p. 31-40.
- Jonson, A.T. 1967. Specific yield: compilation of specific yield for various materials. *U.S. Geological Survey, Water-Supply Paper*, 1662-D, 74 p. Washington.
- MacPhail, D. 1966. El gran lahar del Laja. In Estudios Geográficos. *Universidad de Chile, Departamento de Geología*, p. 133-155.
- Mardones, M.; Jaque, E. 1991. Geomorfología del valle del río Laja. *Instituto Geográfico Militar, Extensos de Ponencias y Seminarios*, p. 115-121. Santiago.
- Moreno, H.; Varela, J. 1985. Geología, volcanismo y sedimentos piroclásticos cuaternarios de la Región Central y Sur de Chile. In Suelos volcánicos de Chile (Tosso, J.; editor). *Instituto de Investigaciones Agropecuarias*, Capítulo 6, p. 491-526. Santiago.
- Muñoz-Cristi, J. 1960. Contribución al Conocimiento Geológico de la Cordillera de la Costa de la Zona Central. *Revista Mineralogía*, Vol. 15, No. 69, 28-47 p.
- Thiele, R.; Moreno, H.; Elgueta, S.; Lahsen, A.; Rebolledo, S.; Petit-Breuilh, M.E. 1998. Evolución geológico-geomorfológica cuaternaria del tramo superior del valle del río Laja. *Revista Geológica de Chile*, Vol. 25, No. 2, p. 229-255.
- Varela, J.; Moreno, H. 1982. Los Depósitos de Relleno de la Depresión Central de Chile entre los ríos Lontué y Bío-Bío. In *Congreso Geológico de Chile*, No. 3, Actas, Vol. 2, p. F280-F306. Concepción.
- U.S. Salinity Laboratory Staff. 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkali soil. *U.S. Department of Agriculture, Handbook*, No. 60, 160 p.