

Las aguas subterráneas en Chile

J.L. Arumí Ribera⁽¹⁾ y R.A. Oyarzún Lucero⁽²⁾

(1) Departamento de Recursos Hídricos. Universidad de Concepción. Av. Vicente Méndez 595. Chillán (Chile)
E-mail: jarumi@udec.cl

(2) Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas. Casilla 599. Benavente 980. La Serena (Chile)
E-mail: royarzun@userena.cl

RESUMEN

Este artículo presenta una visión general sobre las aguas subterráneas en Chile. Para ello, se analiza como los rasgos geológicos, fisiográficos y climáticos del país condicionan la ocurrencia de aguas subterráneas a lo largo de este y como la distribución poblacional y productiva condiciona las demandas de agua. En términos generales, desde Santiago al norte los recursos de agua son escasos y altamente demandados, por lo que existe un gran uso de aguas subterráneas. Al sur de Santiago, existe una relativa mayor abundancia de recursos hídricos superficiales, por lo que las aguas subterráneas no han sido ampliamente explotadas, pero el agotamiento de los derechos de uso de los recursos superficiales está produciendo un fuerte aumento de la explotación de aguas subterráneas. En Chile existe una fuerte tradición en la participación del sector privado en la distribución y administración de los recursos hídricos. En el caso de las aguas subterráneas, esta tradición recibe un impulso gracias a la reciente modificación del Código de Aguas. Institucionalmente existen organizaciones del Estado de Chile que están haciendo grandes esfuerzos por modernizar su gestión, por ejemplo incorporando el uso de bases de datos accesibles a través de Internet. Sin embargo no existe suficiente información básica sobre los sistemas de aguas subterráneas por lo que es necesario incrementar la investigación que se realiza actualmente en Chile.

Palabras clave: aguas subterráneas, Chile, Iberoamérica

Groundwater in Chile

ABSTRACT

This paper is a general revision about groundwater in Chile. An analyzed in done to understand how the Chilean geology, physiography and climate determine the occurrence of groundwater formations in Chile and how the population and economical activities affect the demand of water. From Santiago to north, water resources are limited so groundwater if highly used. South of Santiago, there is more available superficial water, so traditionally groundwater used had been limited; however, superficial water rights are not longer available, and groundwater exploitation is increasing. In Chile there is a strong tradition in the participation of water users in the administration of the resource. In groundwater, this tradition is strength by the newest modification of Chilean Water Law. Different agencies of the Chilean Government are doing a strong work in modernization, for example in the use of Internet accessible data bases. In spit of that, there is a lack of basic information about Chilean groundwater systems, which make necessary an increase on research.

Key words: groundwater, Chile, Iberoamerica

Introducción

Por su longitud y angostura Chile es un país de contrastes. En un día despejado, desde las costas de Valparaíso se puede ver la cumbre del Aconcagua que está ubicado en Argentina; sin embargo, el país es tan largo que cubre 38 grados de Latitud, desde poco más al norte del Trópico de Capricornio a cerca del Círculo Polar Antártico. Por otro lado, en Chile existe el desierto más árido del mundo (Atacama, Región II) y una de las zonas de mayor disponibilidad de agua (Aysén, Región XI).

En el ámbito de las aguas subterráneas también existen interesantes contrastes. En el Norte de Chile, estas aguas son un recurso valiosísimo por el cual hay permanentes conflictos, pero en el Sur del país, hasta hace unos diez años apenas se consideraban. Actualmente existe una convicción de la importancia de las aguas subterráneas, pero hay una gran escasez de información básica sobre los sistemas de aguas subterráneas, especialmente al sur de Santiago.

Este trabajo tiene como objetivo entregar una visión general sobre las aguas subterráneas en Chile. Sin entrar en detalles específicos, se describe como

los factores geológicos y climatológicos afectan la disponibilidad de agua subterránea a lo largo del territorio chileno y como los asentamientos humanos y la actividad económica afectan la demanda de este recurso.

Situación geográfica

El territorio Continental Chileno se encuentra ubicado en una faja de aproximadamente 4.200 kilómetros de largo y de un ancho que varía entre unos 360 y 100 kilómetros. Esta faja tiene una orientación Norte-Sur y se encuentra limitada al Este por la Cordillera de los Andes y al Oeste por el Océano Pacífico. Administrativamente, y como se muestra en la Figura 1, este territorio se encuentra dividido en trece regiones que son denominadas, de Norte a Sur, como Regiones I a V, Metropolitana y VI a XII.

Marco físico

Rasgos geológicos, fisiográficos y climáticos de Chile

Por estar situado en una región geológica sometida a la subducción de diversas placas oceánicas desde el Paleozoico, el territorio Chileno presenta rasgos geológicos propios de esa posición, entre otros, predominio de rocas ígneas plutónicas y volcánicas de tipo calcoalcalino a intermedio, presencia de potentes series molásicas volcano-sedimentarias que afloran en depresiones intramontañas e importantes mineralizaciones metalíferas (Oyarzún, 1986).

En términos fisiográficos, la mayor parte del territorio está organizado en fajas longitudinales, claramente definidas (Figura 1). Así, al Norte de la latitud 26°S y al Sur de 33°S existen dos cadenas montañosas, la Cordillera de la Costa al Oeste y la Cordillera de Los Andes, de mayor altitud, al Este. Entre ambas cordilleras se extienden sendos valles tectónicos o graben N-S, conocidos como Pampa y Valle Central (Longitudinal) respectivamente (Borgell, 1983; Errázuriz *et al.*, 1992). Estos han recibido cientos a miles de metros de relleno de sedimentos piroclásticos y efusiones volcánicas, de edad cuaternaria y en parte terciaria. Los tipos petrográficos más comunes corresponden a andesitas y dacitas en la Pampa, y a basaltos, andesitas, dacitas y riolitas en el Valle Central (Moreno y Varela, 1985).

En el segmento situado al Norte de la latitud 26°S (Regiones I y II), el clima árido y el escaso drenaje han favorecido el desarrollo de salares y de los denominados "caliches salitreros" explotados por la

industria productora de nitratos de sodio, yodo y sulfato de sodio. Actualmente, existe una escasa actividad agrícola en sus planicies, dada la extrema aridez que ellas presentan y los elevados niveles de sales tanto en suelo como en agua (Peña, 1992). Con respecto a los suelos, éstos son de mínimo desarrollo y corresponden a los Ordenes Aridisol y Entisol (Luzio y Alcayaga, 1992).

Sobre el extenso graben del sur (33°-41°S), conocido como Valle Central o Longitudinal, se desarrolla la mayor parte de la agricultura chilena, debido a un régimen hidrológico más favorable y a suelos de mejor aptitud agrícola (Regiones V a X). El depósito que constituye el relleno incluye una mayor participación de materiales de origen fluvioglacial y línico, así como horizontes del suelo formados por cenizas y otros materiales procedentes del volcanismo cuaternario (Borgell, 1983). Además, ligado a la actividad volcánica se desarrollaron gruesos y extensos depósitos laháricos en forma de abanicos, así como depósitos de flujos piroclásticos (ignimbríticos) y de cenizas (Moreno y Varela, 1985). Esto provoca en los



Fig. 1. Rasgos fisiográficos de Chile (modificado de González *et al.* 1999). I a XII: División administrativa de Chile (Regiones)
Fig. 1. Physiographic traits of Chile (modified from González *et al.* 1999). I to XII: Administrative division of Chile (Regions)

suelos la existencia de horizontes de baja permeabilidad y, en consecuencia, la presencia de acuíferos colgados con niveles freáticos poco profundos.

La importancia del material volcánico en el origen y desarrollo de los suelos del Valle Central queda en evidencia si se considera que cerca del 50 a 60% de la superficie cultivable del país (5.400.000 ha) corresponde a suelos volcánicos. Estos se clasifican en el orden Inceptisol, suborden Andepts, de acuerdo al sistema de taxonomía del USDA, pero son conocidos también como Andosoles, de acuerdo al sistema FAO/UNESCO (Besoin, 1985). Se ubican preferentemente entre la zona de Santiago (34°S) y Puerto Montt (41°S), y un 60% de ellos corresponden al tipo denominado localmente como "Trumao". Estos suelos se caracterizan entre otros aspectos, por sus texturas moderadamente finas y por la existencia de una intensa actividad biológica, así como por tener abundante carbono orgánico, al menos en el primer metro del suelo, correspondientes a los horizontes A y B. Mineralógicamente, las arcillas corresponden a alofán, imogolita y diversos silicatos en variada proporción (Besoin, 1985). Igualmente, es posible encontrar en el Valle Central Molisoles, lo que demuestra un mayor grado de evolución y mayor acumulación de materia orgánica (Luzio y Alcayaga, 1992). De hecho, los niveles de materia orgánica aumentan considerablemente de N a S, con niveles de 1,3 a 5% alrededor de los 34°S, 3 a 8% entre 35°-37°S, alcanzando valores de 10 a 20% entre los 38° y 42° S (Rodríguez, 1990; en Honorato, 1994).

Finalmente, el segmento situado entre 26°-33°S (Regiones III y IV) está constituido por un macizo montañoso casi continuo, cortado por estrechos valles fluviales transversales y por algunas cuencas en su parte sur (Endlicher y Weischet, 1986). Esta diferencia geomorfológica coincide además con la ausencia de volcanismo cuaternario, debido a unas condiciones geodinámicas particulares de esta zona. En este sector de valles transversales, los terrenos agrícolas están constituidos por terrazas aluviales formados por sedimentos gruesos (bloques, gravas y arenas) procedentes de la erosión de la cadena andina. Su litología dominante es volcánica y plutónica intermedia, con participación menor de rocas sedimentarias (Rivano y Sepúlveda, 1991; Paskoff, 1993). Los suelos presentan un mayor grado de desarrollo, clasificándose principalmente como Aridisoles y en la parte sur como Alfisoles (Luzio y Alcayaga, 1992; Oyarzún y Alvarez, 2001).

Con respecto al clima, las variaciones más importantes se producen en el territorio chileno principalmente por efecto de la latitud y, en forma secundaria, por la altitud, y se reflejan esencialmente en los regi-

menes pluviométricos existentes a lo largo del país (Figura 2). No ocurre lo mismo con las temperaturas pues existe una relativa homogeneidad térmica a lo largo del país. Esto se debe a la influencia moderadora del océano, a la acción de la corriente de Humboldt y al movimiento de las masas de aire (DGA, 1987).

Hidrografía

Debido a su particular condición fisiográfica, en Chile no existen cuencas de grandes extensiones. La cuenca de mayor superficie es la del río Loa, ubicada en la II Región, con una superficie de aproximadamente 33.000 km² (DGA, 2005); sin embargo, por la escasa precipitación que recibe dicha cuenca, el caudal del Loa es muy bajo. El Río más caudaloso de Chile se encuentra al otro extremo del país, en la XI Región; este es el río Baker que tiene un caudal medio de 1.011 m³/s (DGA, 1987). No obstante lo anterior, combinando tanto el caudal como la superficie y la población existente, la cuenca más importante de Chile es la cuenca del río Biobío (compartida por las Regiones VIII y IX), que drena una superficie de aproximadamente 24.000 km² y tiene un caudal medio de 950 m³/s (DGA, 1987).

En Chile hay 101 cuencas hidrográficas (DGA; 2005). La tendencia general es que estas cuencas drenen hacia el Océano Pacífico, la excepción a esta regla la constituyen algunas cuencas endorreicas y otras cuencas menores compartidas entre Chile y Bolivia. Desde la III Región al sur, todas las cuencas drenan sus aguas al Océano Pacífico, pues el límite entre Chile y Argentina se definió usando la línea divisora continental de las aguas.

Las principales cuencas del país nacen en la vertiente occidental de la Cordillera de los Andes y drenan hacia el Oeste, cruzando la Cordillera de la Costa y recibiendo los aportes de pequeñas cuencas que se forman en la vertiente oriental de esta última formación. Finalmente, existe un importante número de pequeñas cuencas costeras (de hasta unos 200 km²) que nacen en la vertiente occidental de la Cordillera de la Costa y drenan directamente al Océano Pacífico.

En la I y II Región, zona conocida como Norte Grande, la alta evaporación que se produce desde los salares es comparable e incluso en algunos casos superior a la escorrentía que abandona las cuencas (DGA, 1987). La temporada de lluvias de esta zona se produce entre los meses de diciembre y marzo, y recibe el nombre local de "Invierno Boliviano".

En las regiones III y IV, zona también conocida como el Norte Chico, los ríos forman valles estrechos que escurren hacia el Océano Pacífico. El régimen

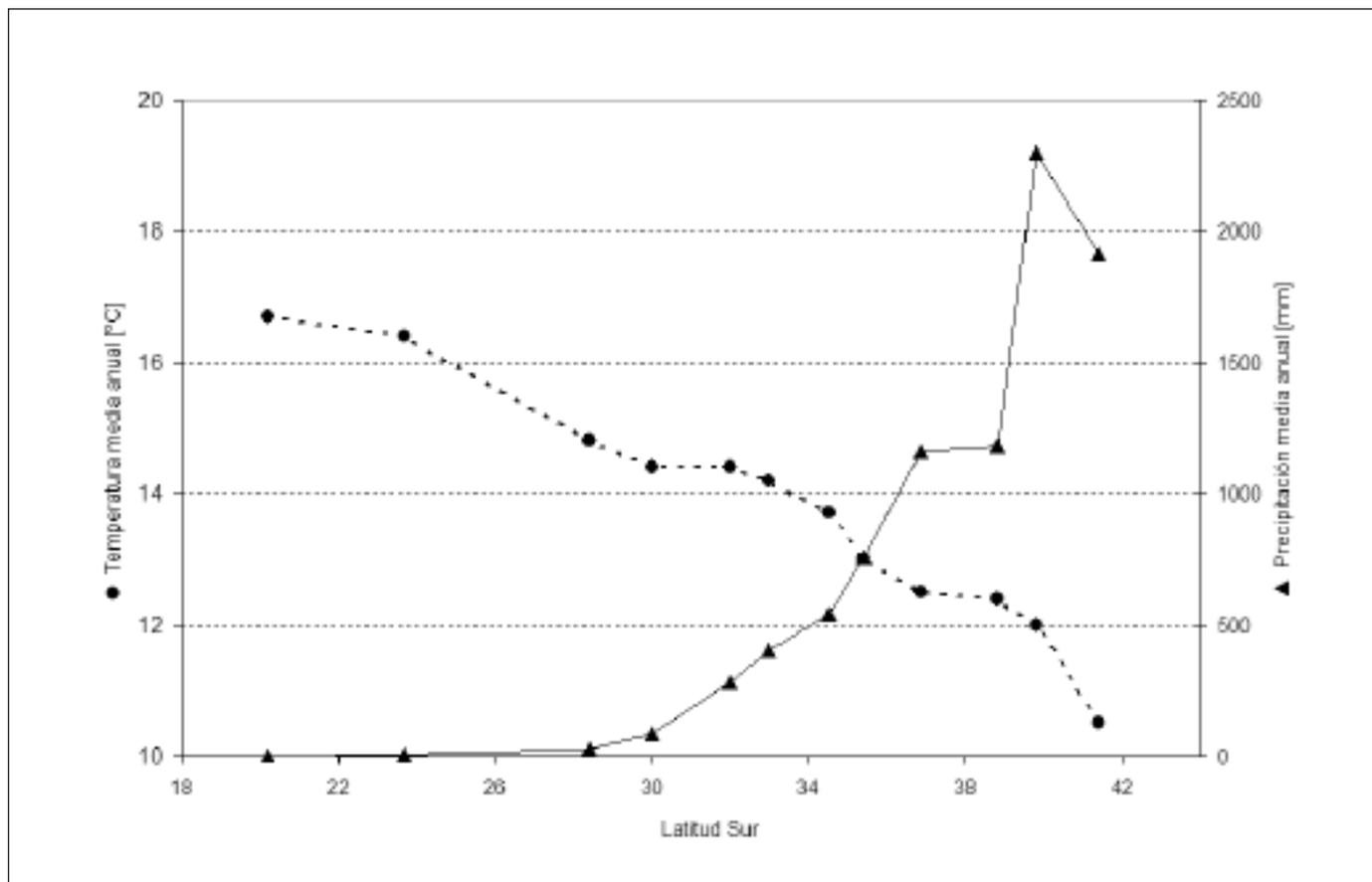


Fig. 2. Distribución territorial de las precipitaciones. Elaboración propia con datos de DGA (1987)
 Fig. 2. Territorial distribution of rainfall in Chile. Based on data from DGA (1987)

hídrico de estos ríos está fuertemente influenciado por el derretimiento de la nieve que se almacena en la Cordillera de los Andes. Al sur del Paralelo 33° S, el régimen hídrico de las cuencas es cada vez más influenciado por las precipitaciones y en general las cuencas andinas tienen un marcado régimen nivopluvial. Desde la III Región al Sur, las precipitaciones tienden a concentrarse entre los meses de mayo a septiembre.

Marco socioeconómico

Población

La distribución de la población en Chile está fuertemente concentrada en la zona central (Regiones V a VIII) donde se ubica el 74,3% de la población (INE; 2005), ya que tal y como se explicó anteriormente, esta zona presenta las mejores condiciones para la producción agrícola.

Con respecto a la distribución de la población en el

resto del país, en el extremo norte (regiones I y II) se concentra el 5,7% de la población; entre las regiones III y IV el 5,6%; entre las regiones IX y X el 12,7% y en las regiones australes (XI y XII) se encuentra el restante 1,7% de la población chilena.

Sectores económicos

Según datos oficiales del Gobierno Chileno (www.odepa.cl), del total del Producto Interno Bruto (PIB) de Chile los sectores con mayor participación son la minería (15,9%) y la pesca (12,6%). La industria manufacturera ocupa un 7,9% y la agricultura un 4,5% del PIB. Estas cifras, analizadas aisladamente pueden inducir a error pues no consideran las cadenas productivas que se organizan cuando actividades como el transporte, servicios y proveedores se concatenan dentro de algunas de las actividades principales. Considerando lo anterior, las actividades económicas principales de Chile son: la Minería, que se desarrolla desde la VI región hacia el norte; La Pesca, que se

desarrolla en todo el litoral; y el sector Silvoagropecuario, que se desarrolla principalmente desde la IV Región hacia el sur.

Marco institucional

Código de Aguas

En el tema de los recursos hídricos, tanto superficiales como subterráneos, el marco jurídico chileno queda establecido por el Código de Aguas. Esta legislación define al agua como un Bien Nacional de uso público y obliga al Estado a asumir una tutela especial sobre este recurso (DGA, 1999). El derecho de aprovechamiento del agua es otorgado por el Estado en forma gratuita y a perpetuidad y pasa a constituir parte del patrimonio de aquellos que lo recibieron (Segura, 2003). Es así como este derecho de aprovechamiento se transforma en un bien económico, que puede ser negociado en el mercado.

El Estado, a través de la Dirección General de Aguas (DGA), debe velar para que la asignación de los derechos de aprovechamiento se realice en forma sustentable. En el caso de las aguas subterráneas, esto significa que el otorgamiento de nuevos derechos de aprovechamiento de aguas dependerá de la evaluación de la recarga del acuífero explotado y de que no interfiera con derechos previamente existentes.

Es importante destacar tres aspectos de la reciente modificación del Código de Aguas, entrada en vigencia en junio del 2005: I) Reconoce legalmente que las aguas subterráneas son parte del sistema hidrológico de una cuenca; II) Posibilita la formación de comunidades de agua subterránea para el manejo y control de acuíferos y III) Facilita legales la recarga artificial del agua subterránea, pues permite la inscripción de derechos de aprovechamiento sobre la base del volumen recargado al acuífero.

Instituciones y organizaciones

En Chile existe una fuerte tradición en la distribución y administración de los recursos hídricos que se remonta a los inicios de la república en los primeros años del siglo XIX. La organización básica es la Comunidad de Aguas, que es una organización de dos o más usuarios que comparten una fuente común. Una Asociación de Canalistas corresponde a una organización de usuarios de un cauce artificial que conduce y distribuye el agua que es captada desde una determinada fuente. Finalmente la Junta

de Vigilancia es la organización de usuarios que comparten un cauce natural (Segura, 2003).

Desde el punto de vista institucional, la administración de los recursos hídricos recae sobre la Dirección General de Aguas (DGA). Entre otros organismos públicos relacionados directamente con el tema hídrico continental, se pueden mencionar instituciones como la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH), la Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS) y La Comisión Nacional de Riego (CNR). Otros organismos que se relacionan indirectamente son la Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA), el Servicio Nacional de Salud (SNS), la Superintendencia de Electricidad y Combustibles (SEC) y el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN). Todas estas instituciones manejan bases de datos relacionadas con el tema hídrico, pero dependen de distintos ministerios y no existe coordinación entre sus bases de datos.

Además de las entidades públicas antes mencionadas, las Universidades e Institutos de Investigación, poseen sus propias bases de datos, pero tampoco hay un intercambio fluido de información entre estas instituciones y las del sector público.

En los últimos años la informática y las Internet han permitido avances notables, prueba de ello son las páginas de la DGA, CNR y CONAMA (www.dga.cl; www.cnr.cl; www.sinia.cl), que poseen bases de datos y desde las cuales es posible obtener información sobre los recursos hídricos de Chile. Sin embargo, aún falta avanzar hacia la creación de bases de datos, a nivel regional, que centralicen la información existente sobre cada cuenca.

Situación de las aguas subterráneas en Chile

Importancia de las aguas subterráneas

A comienzos de la década de 1990, (Peña *et al.*, 1990) hicieron notar la importancia estratégica que tenía para el desarrollo del país el aprovechamiento de los recursos hídricos subterráneos. Entre las principales ventajas identificadas, de acuerdo a la situación chilena, destacaban el hecho de que el agua subterránea en general presenta una menor variabilidad hidrológica que los recursos superficiales. También presenta menores riesgos de contaminación, propiedades químicas y bacteriológicas adecuadas y su explotación en las cercanías de los centros de consumo es generalmente factible. De igual manera, dichos autores señalaban al nitrato, derivado de actividades agrícolas y uso de fertilizantes, como uno de los agentes químicos que representaba mayor riesgo con respec-

to a la contaminación de los acuíferos y la calidad de sus aguas.

En el caso del uso de agua subterránea para consumo humano, cabe señalar que más de un 40% del volumen total consumido en las zonas urbanas de Chile tiene dicho origen, y en el caso del agua potable rural, esta cantidad aumenta a un 76%. Aún más, si sólo se considera la zona del Valle Central de Chile, entre la Región Metropolitana y la VIII Región, más de un 83% del agua potable consumida en zonas rurales es obtenida mediante la explotación de los acuíferos allí existentes (Pizarro *et al.*, 1999). Con esto queda de manifiesto la necesidad e importancia de preservar la calidad de los sistemas de aguas subterráneas del país, en especial aquellos situados en la zona central, ya que allí se concentra el 77% de la población urbana y más de un 60% de la población rural (INE, 1999).

En la zona comprendida desde la Región Metropolitana al Norte los recursos hídricos subterráneos adquieren una importancia vital, pues la disponibilidad de precipitaciones es cada vez menor en esa dirección, cabe destacar que han transcurrido períodos de 20 años sin que se registraran precipitaciones en la ciudad de Iquique (I Región). Por esa razón, el conocimiento de las formaciones acuíferas y los conflictos que se derivan de su uso es muy superior al norte de Santiago que al sur de esa ciudad.

Acuíferos existentes

Considerando las características geológicas-geomorfológicas antes descritas, se puede decir que los acuíferos en Chile se concentran en la zona Norte (I y II Región) y en el Valle Central (V a X Región). En la figura 3 se puede apreciar un plano indicativo de los acuíferos identificados en Chile, que según antecedentes de la DGA son más de un centenar (DGA, 1991). En general los acuíferos son superficiales y de gran espesor (Figueroa, 2004).

En el Norte Grande (Regiones I y II) las formaciones acuíferas se ubican principalmente en la Pampa y en los valles costeros. Sin embargo la baja ocurrencia de precipitaciones y la alta evaporación causan una muy baja recarga, por lo que una gran parte del almacenamiento existente corresponde a agua fósil.

En el Norte Chico (Regiones III y IV) los principales acuíferos se sitúan en los valles fluviales, aunque también existen acuíferos costeros. La recarga se origina por las precipitaciones y las infiltraciones de escorrentía superficial, especialmente durante el derretimiento de nieves. En esta zona, la Universidad de la Serena está desarrollando una investigación pionera en Chile al evaluar la importancia de los acuíferos formados por rocas fracturadas (www.ceaza.cl).

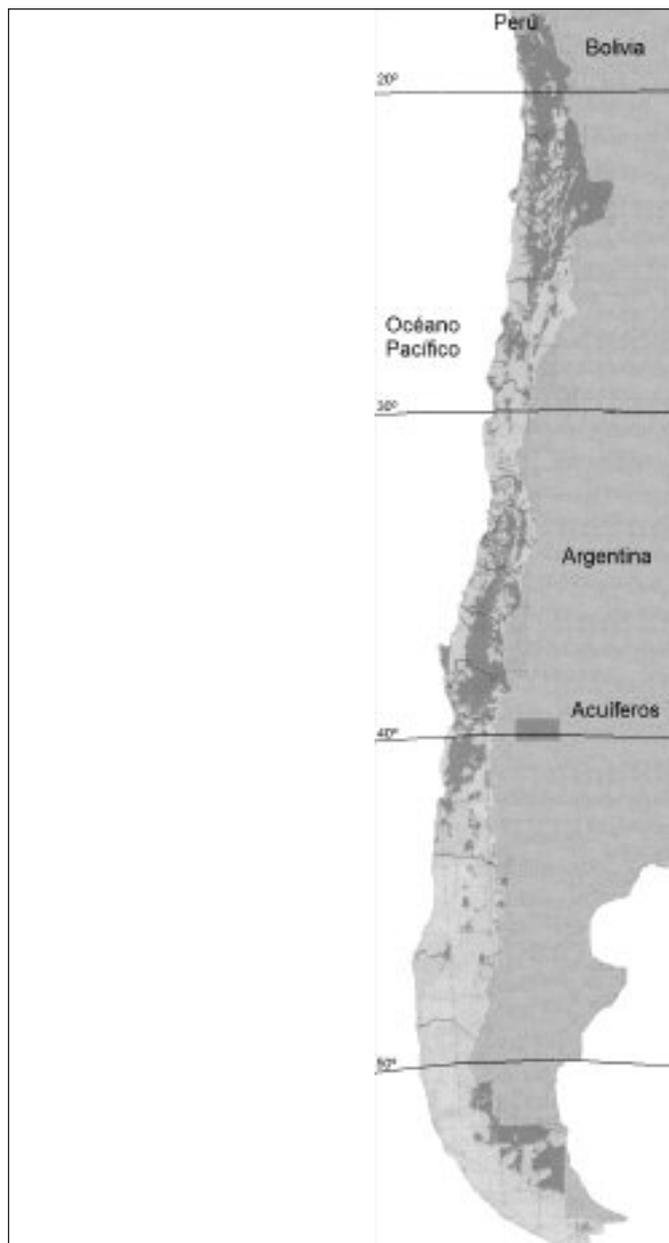


Fig. 3. Formaciones acuíferas en Chile (adaptado de Figueroa, 2004)

Fig. 3. Aquifer formation in Chile (modified from Figueroa, 2004)

Los acuíferos del Valle Central se sitúan sobre un relleno de tipo sedimentario, constituido por sedimentos de carácter aluvial depositados por los ríos que descienden desde la cordillera andina, de carácter eminentemente volcánico (González *et al.*, 1999). Al llegar a las planicies del Valle Central, estos ríos ven disminuida su energía y capacidad de transporte, depositando su carga de bloques, gravas y arenas y determinando la formación de acuíferos de buena conductividad hidráulica, siendo la mayoría de ellos

del tipo libre o semiconfinado. Las profundidades a las cuales se encuentra el nivel freático son variables, disminuyendo desde los sectores del valle central próximos a la cordillera de Los Andes hacia los cursos medios e inferiores de los ríos, donde llega a pocos metros (Peña *et al.*, 1990). Además, la interacción entre aguas superficiales y subterráneas, en general en Chile, es muy activa (Peña, 1992), por lo que el nivel freático suele elevarse considerablemente en épocas invernales como consecuencia de un mayor volumen de precipitaciones, llegando normalmente a muy poca distancia de la superficie o simplemente aflorando sobre ella.

Disponibilidad y demanda de agua subterránea

Estimaciones hechas por la Dirección General de Aguas indican que la disponibilidad renovable de agua subterránea en Chile, en la zona ubicada al norte de Santiago, asciende a 65 m³/seg; para esta misma área los derechos solicitados al año 2000 eran de 300 m³/seg (Muñoz, 2000). Lo anterior implica una fuerte controversia pues la DGA no otorga más derechos que la capacidad renovable de los acuíferos, pero los intereses privados reclaman un mayor aprovechamiento del agua subterránea, lo que permitiría un mayor desarrollo económico, que esta hoy muy limitado por la escasa disponibilidad de agua. En ese aspecto cabe destacar que el mercado de los derechos de aguas funciona mucho mejor en la zona norte del país que en la zona sur.

Producto de la escasez de agua, se están desarrollando iniciativas como la desalinización de agua de mar en el norte de Chile y se está comenzando a estudiar la recarga de acuíferos en zonas de la IV Región y en la Región Metropolitana, práctica que aún no se ha utilizado en Chile (Brown, 2002).

Desde la VI Región al sur, los derechos solicitados al año 2000 ascienden a unos 20 m³/seg (Muñoz, 2000) lo que implica una menor presión sobre la explotación de aguas subterráneas. Esto se explica por la relativa mayor abundancia de recursos superficiales. Sin embargo es importante considerar que desde la VIII Región hacia el norte los derechos de aprovechamiento de las aguas superficiales están agotados, lo que significa que se han otorgado derechos de uso sobre todas las aguas superficiales disponibles. Esto implica que cada vez habrá una mayor demanda por los derechos de explotación del agua subterránea.

Calidad de las aguas subterráneas

La Tabla 1 presenta un resumen de los antecedentes

existentes acerca de los problemas generales de calidad de aguas subterráneas en Chile. Como se puede apreciar, en el Norte Grande de Chile, se presentan problemas de calidad de agua asociados a la presencia de arsénico. En el Norte Chico existen principalmente problemas asociados a la presencia de sulfato, manganeso y cloruros. Entre la VII y la X regiones un problema muy común es el alto contenido de hierro en las aguas que causa problemas de incrustaciones en los sistemas de microrriego.

En lo referente a la contaminación difusa, las principales fuentes de contaminación corresponden a lixiviación de sales del suelo y el uso de químicos en la agricultura (fertilizantes y/o pesticidas). En la zona norte de Chile se han detectado procesos de salinización en las zonas agrícolas existentes en los pequeños valles donde esta actividad puede ser desarrollada (DGA, 1999).

En la Región Metropolitana se han detectado problemas de alta concentración de nitratos en el agua subterránea, pero diversos estudios muestran que la principal causa de dicha contaminación proviene del riego con aguas fecales y vertido de residuos urbanos e industriales vertidos al ambiente sin tratamiento previo, mientras que la contaminación por fertilizantes sería sólo una fuente secundaria (Schalscha *et al.*, 1979; Grilli *et al.*, 2000; Falcón y Matutano 2000).

En este sentido en Chile no hay una cuantificación del impacto que supone la descarga incontrolada en los acuíferos de residuos domésticos e industriales. Solamente desde el año 2002 existe una norma que

| Región | Parámetro que excede Norma de Agua Potable |
|---------------|---------------------------------------------------|
| I | Cloruro, arsénico y manganeso |
| II | Arsénico y sulfato |
| III | Sulfatos |
| IV | Sulfatos, hierro y manganeso |
| V | Manganeso, sulfatos, hierro y cloruros |
| Metropolitana | Sulfatos, hierro, manganeso |
| VI | Manganeso, puntualmente plomo y mercurio |
| VII | Hierro |
| VIII | Hierro, algo de manganeso y puntualmente mercurio |
| IX | Hierro |
| X | Hierro |
| XI | Sin Problemas |
| XII | Sin Problemas |

Tabla 1. Calidad de Aguas Subterráneas en Chile. Parámetros cuya concentración exceden valores de la norma chilena para agua de bebida (modificado de Donoso *et al.*, 1999)

Table 1. Groundwater quality in Chile. Parameters that exceed Chilean drinking water standard values (modified from Donoso *et al.*, 1999)

regula las emisiones de residuos líquidos al agua subterránea. Por esta razón se sospecha que existen muchos lugares contaminados, en especial por industrias antiguas, que deberán ser identificados y controlados en el futuro. Lo anterior hace prever un importante desarrollo de la industria de descontaminación y prevención en los próximos diez años en Chile.

Desde la VI Región a la X Región, las altas tasas de utilización de fertilizantes nitrogenados en la actividad agrícola determinarían altos niveles de contaminación de las aguas subterráneas subyacentes. Este problema debiera ser especialmente importante en aquellas zonas con cultivos anuales, donde se utilizan altas dosis de fertilizantes y grandes volúmenes de agua de riego; tomando en cuenta además la estrecha relación existente entre la baja eficiencia de las prácticas de riego tradicionales y los procesos de lixiviación y contaminación por nitratos (Donoso *et al.*, 1999). Sin embargo, al realizar un análisis de la limitada y dispersa información existente, es posible inferir que los nitratos no constituyen actualmente, y en general, un problema de importancia en lo que se refiere a contaminantes presentes en aguas subterráneas de Chile. Por ejemplo, Claret *et al.* (2001) analizaron los niveles de contaminación química y biológica en aguas subterráneas en una zona rural de 65.000 ha de la VI Región. En ellas detectaron elevados niveles de contaminación con coliformes totales y fecales (93% y 100% de las muestras respectivamente) pero no así en el caso de los nitratos, donde sólo un 14% de las muestras analizadas presentaban niveles por sobre la norma. Igualmente, en estudios realizados en otras cuencas del Valle Central (VI y VIII Región), la Universidad de Concepción ha detectado, en general, bajas concentraciones de N-NO₃⁻ en aguas subterráneas (Arumí *et al.*, 2005). Por ello la contaminación del agua subterránea por nitratos no se destaca como un problema de importancia en el Valle Central en general y menos en el resto del país. Es posible inferir que, en general las características de los acuíferos (superficiales, de alta permeabilidad y con alto contenido de carbón orgánico) favorezcan los procesos de dilución, transporte y desnitrificación (Arumí *et al.*, 2005)

Conclusiones

El manejo y protección de las aguas subterráneas es un problema que se está tornando cada vez mas complejo en Chile. Los cambios particulares que ha tenido el país en los últimos años están produciendo un aumento de la demanda por agua subterránea, y al

mismo tiempo una mayor preocupación de la opinión pública por la protección de los recursos naturales, que se refleja en la puesta en vigencia de nuevas regulaciones ambientales.

La obtención y facilidad de acceso de información básica sobre los sistemas de aguas subterráneas (tal como la caracterización de los acuíferos, determinación de fuentes de recarga, estadística histórica de niveles freáticos, etc.) es un aspecto crítico que debe ser abordado. En este sentido son destacables los esfuerzos que está realizando el Gobierno de Chile al crear bases de datos con acceso público a través de la Internet.

En el sector universitario chileno existen muy pocos grupos de investigación que estudian las aguas subterráneas, por lo que es necesario expandir esta actividad. Esta necesidad se contrapone con el hecho de que, al igual que en el caso de otras disciplinas donde se estudian los recursos naturales, la obtención de información básica sobre los sistemas de aguas subterráneas se limita por la dificultad de acceder a fuentes de financiamiento. Lo anterior es producto de que en Chile se tiende a privilegiar la investigación tecnológica. Sin embargo, esta situación puede generar la paradoja de que proyectos tecnológicos con implicaciones productivas, no dispongan de la información necesaria para la evaluación de los impactos ambientales que ellos producen.

Referencias

- Arumí, J.L., Oyarzún, R.A. y Sandoval, M. 2005. A discussion about natural protection against groundwater pollution by nitrates in the Central Valley of Chile. *Hydrological Sciences-Journal*, 50 (2), 331-340.
- Besoain, E. 1985. Los suelos. En: Tosso, J. (ed.), *Suelos volcánicos de Chile*. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Ministerio de Agricultura, Chile, 25-106.
- Borgel, R. 1983. *Geografía de Chile, Tomo II: Geomorfología*. Instituto Geográfico Militar, Santiago, Chile, 182 pp.
- Brown, E.F. 2002. Recarga Artificial de Acuíferos. *Revista de la Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica*. 17 (1), 33-40.
- Claret, M., Ortega, R., Mardones, R., Andreu, L., Quezada, J. y Perez, C. 2001. Contaminación química y microbiológica en agua de pozos para consumo humano. Su dimensión geográfica expresada mediante un SIG. *Sistemas*, 16 (1), 5-7.
- DGA. 1987. *Balance hídrico de Chile*. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas (DGA), Santiago, Chile, 58 pp.
- DGA. 1991. *Mapa Hidrogeológico de Chile*. Ministerio de Obras Públicas, Dirección general de Aguas (DGA), Santiago, Chile, 6 Láminas.

- DGA. 1999. *Política nacional de Recursos Hídricos*. Ministerio de Obras Públicas, Dirección general de Aguas (DGA), Santiago, Chile, 58 pp.
- DGA. 2005. Página institucional, Chile, 05/12/2005 www.dga.cl, e-mail: info@dga.cl.
- Donoso, G., Cancino, J. y Magri, A. 1999. Effects of agricultural activities and water pollution with nitrates and pesticides in the Central Valley of Chile. *Wat. Sci. Tech.*, 39(3), 49-60.
- Endlicher, W. y W. Weischet. 1986. Rasgos fisiográficos de Chile. En: J. Frutos, R.E. Oyarzún, y M. Pincheira. (ed.), *Geología y recursos minerales de Chile*, Universidad de Concepción, Concepción, Chile, 13-28.
- Errázuriz, A.M., González, J.I., Henríquez, M., Cereceda, P., González, M. y Rioseco, R. 1992. *Manual de Geografía de Chile*. Editorial Andrés Bello, Santiago, Chile, 415 pp.
- Falcón, M.F. y Matutano, G. 2000. Contaminación de nitratos en las aguas subterráneas del sector poniente de la cuenca de Santiago, Región Metropolitana, Chile. *IX Congreso Geológico Chileno*, Santiago, 37-41.
- Figueroa, J.P.F. 2004. Las aguas subterráneas en el mundo. *Revista Chileriego*. 17, (Julio 2004), Comisión Nacional de Riego, Santiago, Chile, 25-27.
- González, L., Mardones, M., Silva, A. y Campos, E. 1999. Hidrogeoquímica y comportamiento del agua subterránea en la cuenca del río Claro, Región de Biobío, Chile. *Revista Geológica de Chile*, 26 (2), 145-157.
- Grilli, A., Tore, C., Aguirre, E. y Moya, P. 2000. Cuidado con el nitrato. *Revista Vertiente*, Capítulo Chileno de ALHSUD, 5 (5), 26-29.
- Honorato, R. 1994. *Manual de edafología*. Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile, 241 pp.
- INE 2005. Estadísticas sociales y económicas. Chile, 15/06/2005, www.ine.cl, e-mail: info@ine.cl.
- INE. 1999. *Chile, estimaciones de población, por sexo y edad. Total país y regiones. 1990-2005, urbano-rural*. Instituto Nacional de Estadísticas de Chile, Santiago, Chile, 100 pp.
- Luzio, W. y Alcayaga, S. 1992. Mapa de asociaciones de grandes grupos de suelos de Chile. *Agricultura Técnica*, 52 (4), 347-353.
- Moreno, H. y Varela, J. 1985. Geología, volcanismo y sedimentos piroclásticos cuaternarios de la Región Central y Sur de Chile. En: Tosso, J. (ed.), *Suelos volcánicos de Chile*. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Ministerio de Agricultura, Chile, 491-526.
- Muñoz, J.R. 2000. Como estamos en casa. *Revista Vertiente*, Capítulo Chileno de ALHSUD. Santiago, 5 (5), 6-10.
- Oyarzún, J. 1986. Magmatismo y metalogénesis andina en Chile. Geología y recursos minerales de Chile. En: J. Frutos, R.E. Oyarzún, y M. Pincheira. (ed.), *Geología y recursos minerales de Chile*, Universidad de Concepción, Concepción, Chile, 443-468.
- Oyarzún, R.A. y Alvarez, P.A. 2001. Morfología de suelos de la Cuenca de Talhuén del secano semiárido de la IV Región, Chile. *Agricultura Técnica*, 61(4), 517-521.
- Paskof, R. 1993. Geomorfología de Chile semiárido. Universidad de La Serena, Chile (traducción de E. Novoa). pp. 321.
- Peña, H. 1992. Caracterización de la calidad de las aguas naturales y contaminación agrícola en Chile. Prevención de la contaminación del agua por la agricultura y actividades afines. *Anales de la Consulta de Expertos*. FAO, ONU, 75-86.
- Peña, H., Abeliuk, R., Cabrera, G., Castillo, J., Muñoz, J., Pérez, F. y Salazar, C. 1990. El problema de la contaminación de las aguas subterráneas en Chile. *Revista de la Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica*, 5(3), 25-42.
- Pizarro, R., Salazar, C., Bravo, C., Caro, J., Bravo, P. y Carrasco, P. 1999. Recursos hídricos. En: Sunkel, O., Brzovic, F. y Romaggi, M., (ed). *Informe País, estado del medio ambiente en Chile*, Universidad de Chile, Centro de Análisis de Políticas Públicas, Santiago, Chile, 77-129.
- Rivano, S. y Sepúlveda, P. 1991. *Carta geológica de Chile, 1:250.000. Hoja Illapel, Región de Coquimbo*. Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago.
- Schalscha, E.B., Vergara, I., Schirado, T. y Morales, M. 1979. Nitrate movement in a Chilean agricultural area irrigated with untreated sewage water. *J. Environ. Qual.* 8(1), 27-30.
- Segura, R.F. 2003. *Derecho de Aguas. Facultad de Ciencias Jurídicas y Sociales*. Universidad de Concepción, Concepción, Chile. pp. 171.

Recibido: julio 2005.

Aceptado: noviembre 2005.