

CONSTITUCION DE DERECHOS DE APROVECHAMIENTO SOBRE AGUAS SUBTERRANEAS ALMACENADAS

JOHN HOUSTON¹, ARTURO JENSEN IGLESIAS² Y GONZALO ARÉVALO CUNICH³

SUMARIO: Existen cantidades considerables de agua subterránea en almacenamiento en el norte de Chile, que pueden no recibir recarga actual, y que han sido designadas para su desarrollo como "fuera de los límites". Si tales reservas se mantienen sin desarrollar para siempre, nunca tendrán valor para la gente o para la economía de Chile. El Valle Longitudinal en la Primera Región es un ejemplo de un recurso de agua subterráneo fósil que puede ser de magnitud estratégica. La historia del desarrollo de este acuífero es examinada a la luz de las experiencias globales y nueva información sobre la geología e hidrogeología de la región se está revisando. Una estimación preliminar del almacenamiento total de agua subterránea sería de 50 km³, lo que sería suficiente para abastecer Iquique y Antofagasta por más de 1.000 años. Incluso si esta estimación tuviese un error del 50%, el tamaño potencial de este recurso es tan grande como para requerir en forma urgente una mayor evaluación. Se sugieren nuevos criterios para la evaluación y desarrollo de aguas subterráneas fósiles que toman en cuenta la magnitud e importancia de la reserva, usos alternativos, valores o impactos posibles. Se concluye que existe una clara necesidad de realizar mayor evaluación de dichos recursos y nuevas políticas para su manejo.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Existen grandes cantidades de solicitudes de derechos de aprovechamiento sobre aguas subterráneas almacenadas, especialmente en el norte de Chile, las cuales han sido denegadas o considerablemente retardadas porque: (a) las solicitudes no demuestran claramente que ocurre una recarga del acuífero bajo las condiciones imperantes, o (b) se considera que el acuífero está ya totalmente explotado o

sobreexplotado. Este es un problema de enorme importancia práctica, ya que la economía futura y el bienestar de las regiones depende grandemente de la localización y aprovechamiento de recursos hídricos en el árido Desierto de Atacama.

Hay tres preguntas que deben abordarse si dichas solicitudes han de tratarse imparcialmente a la luz de las demandas actuales y futuras como también de las consideraciones ambientales y de amparo a los derechos de aprovechamiento ya otorgados.

¹ BSc, MSc Universidad de Londres, C.Geol., FGS., FIWEM. Consultor en hidrogeología.

² Geólogo Universidad Católica del Norte, PhD Universidad de Barcelona, Miembro Colegio de Geólogos de Chile, M.Soc.Geol.Chile, Profesor Titular Geología Universidad Católica del Norte.

³ Abogado Universidad de Chile, Magíster (c) Derecho de Aguas Universidad de Atacama. Profesor Derecho de Aguas Pontificia Universidad Católica de Chile.

- La primera pregunta es de carácter legal: ¿Existe alguna razón por la cual los recursos hídricos subterráneos "fósiles" no puedan ser aprovechados?
- La segunda pregunta es de carácter científico: ¿Hay ciertas cuencas ya sobreexplotadas o podrían ellas recibir una recarga superior a la conocida actualmente?

- La tercera pregunta es de carácter político: Si ciertos recursos hídricos subterráneos son "fósiles", ¿deben ellos jamás ser aprovechados?

Este informe tiene por objeto estudiar cada una de estas preguntas con referencia específica a la Pampa del Tamarugal en la I y II Región, pero antes de hacerlo es necesario considerar la definición del término "rendimiento seguro".

Rendimiento seguro se define como "la cantidad de agua que puede ser extraída sin causar efectos indeseables" (Todd, 1959). Los efectos indeseables pueden incluir la disminución de las reservas por sobre la recarga, la disminución de los caudales en contacto con los acuíferos y el perjuicio a usuarios existentes, entre otros. Aunque el concepto de rendimiento seguro se ha usado ampliamente en la evaluación de recursos hídricos subterráneos, siempre ha habido una gran insatisfacción con él (Domenico, 1972). Frecuentemente, la mayor preocupación es el desarrollo de una definición que utilice un concepto de rendimiento en un sentido socioeconómico dentro del marco general de una teoría de optimización. Desde este punto de vista las aguas subterráneas solo tienen valor en virtud de su uso; si jamás se usan, carecen de valor. Por el contrario, un "rendimiento óptimo" se determina a partir de varios esquemas alternativos, como siendo aquel que mejor satisface una serie de objetivos sociales y económicos y que puede llevar *inter alia* a la "explotación" de las aguas subterráneas. Esta es una metodología compleja, pero bien ensayada para el aprovechamiento y administración de recursos naturales (Helweg, 1985).

Además, hay un historial internacional substancial de tecnología avanzada para aumentar sintéticamente los recursos disponibles, tal como la recarga artificial, el uso conjunto de aguas subterráneas y superficiales y la optimización de fuentes múltiples. Muy pocas o ninguna de estas técnicas se han aplicado a la situación en el norte de Chile y resulta esencial que se estimule la investigación y evaluación adicional.

2. LAS BASES LEGALES

La actual legislación de aguas es muy escueta respecto de una materia tan importante

como es la determinación del caudal disponible para los efectos de la constitución de derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas, limitándose simplemente a señalar que la disponibilidad del recurso es una materia que debe ser resuelta por la Dirección General de Aguas (art. 141, inciso final del Código de Aguas).

Ahora bien, la Dirección General de Aguas ha adoptado una política extremadamente conservadora respecto de las aguas subterráneas. Es así que ha denegado en forma sistemática solicitudes de derechos de aprovechamiento en aquellos acuíferos que no tienen recarga o donde las extracciones exceden la recarga, esto es, ha seguido la doctrina denominada del rendimiento seguro. Dicha política puede resultar acertada en aquellos casos en que no se cuenta con información suficiente, o cuando se cuenta con recursos alternativos adecuados, pero no lo es en el caso del norte de Chile, donde tal política conducirá, sin lugar a dudas, al estancamiento del desarrollo económico de una parte importante del país, con las graves consecuencias que de ello se sigue para los habitantes de la zona norte.

En virtud de la política del rendimiento seguro seguida por la Dirección General de Aguas, se estima que el otorgamiento de derechos de aprovechamiento sobre aguas subterráneas almacenadas, importaría una infracción a lo previsto en las normas contenidas en los artículos 22 y 141, inciso final del Código de Aguas, en virtud de las cuales la Dirección General de Aguas solo puede constituir un derecho de aprovechamiento en la medida que exista disponibilidad del recurso y que no se perjudiquen o menoscaben derechos de terceros.

La ley no define ni tampoco entrega un concepto de lo que debe entenderse por disponibilidad del recurso. Tampoco la Resolución DGA N° 186, de 1996, que establece normas de exploración y explotación de aguas subterráneas, se refiere a la materia, razón por la cual, y para los efectos de determinar el correcto sentido y alcance de dicho concepto, deberíamos recurrir a las reglas generales de interpretación.

Sin embargo, la Dirección General de Aguas, en el documento denominado "Normas y Procedimientos para la Administración de Recursos Hídricos", ha establecido un criterio

técnico, en virtud del cual la disponibilidad del recurso no se encuentra determinada solamente por los resultados de las pruebas de bombeo, sino que también es necesario conocer la disponibilidad a nivel de la fuente natural (acuífero). Así, entonces, los resultados de las pruebas de bombeo de un pozo solo permiten establecer el caudal que puede extraerse y explotarse desde un pozo determinado, pero ellas son insuficientes para determinar si existe o no disponibilidad del recurso en el acuífero.

Es lamentable que en el documento citado no se profundice mayormente sobre un tema tan relevante y de vital importancia como es el definir específicamente lo que debe entenderse o lo que constituye la "disponibilidad del recurso".

Así, la Dirección General de Aguas aplica, en forma generalizada, el criterio del "rendimiento seguro", el cual se traduce en la práctica en no otorgar derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas cuando la extracción excede la cantidad de agua que ingresa al acuífero dentro de un cierto período de tiempo. En otras palabras, aunque la ley no prohíbe el otorgamiento de derechos de aprovechamiento sobre recursos fósiles, la política de dicho Servicio es el no otorgamiento de derechos donde la extracción anual excede la recarga anual.

Por otro lado, el otorgamiento de un derecho de aprovechamiento de aguas es a perpetuidad, esto es, el derecho se otorga para siempre (arts. 5, 6, 20, inciso 1°, 112 y siguientes y 121 del Código de Aguas). Lo anterior no implica a primera vista que no puedan otorgarse derechos por encima y más allá de la reposición habitual del acuífero. Sin embargo, independientemente del derecho de extraer a perpetuidad, hay casos donde dichas extracciones se han reducido proporcionalmente a lo largo de un acuífero cuando se ha estimado que el acuífero está sobreexplotado (cuenca "El Chamisero", y parte de la zona de "Chicureo" en la Región Metropolitana). En este último caso, o el recurso fue calculado erróneamente y existió una asignación desacertada, o hubo un cambio en el rendimiento seguro a través del tiempo.

Lo anteriormente expuesto nos conduce a un tema de la mayor importancia, como es aquel referido a si ¿tienen los recursos disponibles un tiempo fijo? En teoría, cuando se otorga un derecho de aprovechamiento es para que su propietario lo utilice por un tiempo indefi-

nido, pero la autoridad (Dirección General de Aguas) no garantiza ni puede garantizar que existirá siempre agua disponible. Claramente, los recursos disponibles no se encuentran fijos a perpetuidad, y existen varios casos documentados donde las cambiantes condiciones ambientales, especialmente las climáticas, variando en el corto y largo plazo, han alterado las condiciones hidrogeológicas y, con ello, la disponibilidad del recurso.

Por otra parte, y en lo referente a la determinación de la disponibilidad del recurso, cabe señalar que si bien dicha materia es de competencia de la Dirección General de Aguas, ella es particularmente debatible desde el punto de vista técnico, y de hecho se discute por muchos acerca de si los recursos disponibles han sido evaluados con exactitud por la autoridad (Dirección General de Aguas), atendido que: a) existe un permanente debate científico respecto de la extensión y magnitud de la recarga en la región, y b) que debe considerarse la posibilidad de descubrir nuevos recursos hídricos, distintos de los existentes, como resultado de las faenas de exploración que se realizan en el lugar.

3. HISTORIA DE LA EXPLORACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN LA CUENCA DEL VALLE LONGITUDINAL Y EL PROCESO CIENTÍFICO

La historia de la exploración y explotación de aguas subterráneas en la cuenca del Valle Longitudinal es una historia larga. El agua subterránea se usaba escasamente durante el período prehistórico y durante el período Colonial dicho uso aumentó constantemente, especialmente a través de fuentes artesianas en Pozo Almonte y Pica. Con el desarrollo de las salitreras a fines del siglo 19, se comenzaron a usar cantidades significativas. Pocos registros detallados fueron conservados hasta la década del 50, donde se registró la perforación de alrededor de cinco pozos al año. A fines de los 60 hubo un súbito aumento a 50-60 pozos al año, pero esto pronto disminuyó a los niveles anteriores. Un segundo auge en la perforación de pozos tuvo lugar a fines de la década del 80. Estos auges parecen estar en gran medida relacionados con las necesidades crecientes de los centros urbanos en desarrollo, especialmente Iquique. De un total probable de alrededor de 500 pozos, hay actualmente unas 32 extraccio-

nes de agua subterránea autorizadas en la Pampa del Tamarugal, llegando a un total de 1.927 l/s.

Los capas acuíferas que abastecen a estos pozos son de importancia crítica para el desarrollo económico del norte de Chile. En común con la mayoría de los desarrollos de aguas subterráneas a nivel mundial, hubo escasos intentos de análisis científico hasta fechas comparativamente recientes. Las investigaciones tempranas incluyeron los estudios geológicos de SERNAGEOMIN durante los 60, incluyendo el trabajo de Galli y Dingman (1962) en Pica, donde los orígenes del agua artesiana fueron descritos por primera vez. El primer estudio hidrogeológico extensivo de la Pampa del Tamarugal fue realizado por JICA (1995) a comienzos de los 90. Desde entonces se han desarrollado varios estudios específicos, entre los cuales destaca el trabajo de Margaritz *et al.* (1990) sobre análisis isotópico, donde se sugiere que alguna recarga tiene lugar a través de un sistema de fisuras profundas en el Altiplano. Sin embargo, no se ha emprendido ningún reconocimiento general completamente moderno de las capas acuíferas del Valle Longitudinal y sus recursos.

Si, por analogía, analizamos el patrón histórico de los recursos petrolíferos podemos ver que después de un auge inicial en la exploración y cuantificación de los recursos, ha habido una disminución constante de estos debido a la explotación. No obstante, en cada etapa de la producción y uso del petróleo, los pronósticos sobre la futura rapidez de disminución de los recursos han sido sobreestimados. Muchos pronósticos hechos durante los 60 y 70 indicaron que virtualmente todas las reservas estarían agotadas para el 2000. El error en estos pronósticos se debió principalmente a las subestimaciones: i) de nuevos descubrimientos, y ii) del impacto de la tecnología de extracción cada vez más sofisticada. Un modelo similar fue propuesto por el Banco Mundial para los recursos de aguas subterráneas, donde consideran que tempranamente en este siglo se verificará la disponibilidad de nuevos recursos de aguas subterráneas debido a las técnicas de exploración y desarrollo de mayor sofisticación.

Dicho patrón se está revelando ahora para las capas acuíferas en el Valle Longitudinal. Recientes estudios geológicos por Jensen (1992) y otros, resumidos abajo, indican que la cuenca

sedimentaria terciaria es muy grande. La extrapolación de parámetros hidrogeológicos conocidos a las partes de la cuenca aún no evaluadas, sugiere que el recurso es probablemente el más grande en el norte de Chile y el de mayor importancia estratégica.

Al mismo tiempo, es probable que la tecnología de la desalinización se vuelva económicamente viable como una alternativa a los recursos de aguas subterráneas naturales en países como Chile, con fácil acceso al mar. Actualmente, el costo es entre un 50 y 100% más caro. Sin embargo, dentro de un período de veintetreinta años esta diferencia de costo desaparecerá. Así, resulta crítico revisar los recursos naturales a la luz del desarrollo económico planificado sobre una escala de tiempo que puede asumirse con seguridad como de 50 años. Dentro de este marco de tiempo es esencial evaluar la ventaja comparativa entre las limitaciones del desarrollo económico y el impacto ambiental adverso, pero es igualmente esencial no limitar el desarrollo económico manteniendo los recursos de aguas subterráneas fósiles como un futuro recurso estratégico; dentro de 50 años el recurso puede no ser necesario. Tales recursos hídricos requieren de un nuevo conjunto de criterios para su evaluación y desarrollo.

4. GEOLOGÍA DE LA CUENCA DEL VALLE LONGITUDINAL

El Valle Longitudinal corresponde a una cuenca de unos 700 km de largo que se rellenó, durante casi todo el Cenozoico, por sedimentos y volcánicas procedentes de las tierras altas de la Cordillera Principal. El basamento de esta cuenca estaba constituido esencialmente por rocas ígneas del Mesozoico y rocas metamórficas del Paleozoico. En ella se estableció un dominio endorreico atribuido al efecto de barrera ejercido por la Cordillera de la Costa que impidió su drenaje hacia el mar. El solevantamiento de dicho rasgo morfoestructural se atribuye a movimientos tectónicos compresivos del Oligoceno (Fase Incaica, Scheuber *et al.* 1995).

Con anterioridad al establecimiento de esta cuenca, se había desarrollado en la región una extensa superficie de erosión cuyos remanentes han sido reconocidos por Galli (1967) en el margen oriental de la Pampa del Tamarugal

(*Pediaplano Choja*) y por Mortimer *et al.* (1974) en la Cordillera de la Costa (*Pediaplano Tarapacá Costa*). Dicha superficie de erosión constituyó ulteriormente la discordancia basal de la cuenca cenozoica. Una toba intercalada en sedimentos de la Formación Sichal, indica que el desarrollo endorreico pudo haberse iniciado a principios del Oligoceno. Por lo tanto, la superficie de erosión se habría formado a fines del Eoceno o principios del Oligoceno. El drenaje endorreico perduró posiblemente hasta fines del Plioceno cuando se abrieron paso las quebradas del norte y el río Loa hasta el mar.

A lo largo del Valle Longitudinal del norte de Chile se pueden diferenciar cuatro cuencas parcialmente separadas entre sí por umbrales del substrato rocoso preoligoceno. De norte a sur estas cuencas son: (1) la Cuenca de Camarones, (2) la Cuenca del Tamarugal, (3) la Cuenca de Quillagua y Llamara, y (4) la Cuenca de Miraje.

4.1. Cuenca de Camarones

La Cuenca de Camarones está situada al norte de Huara (19° 50'S) y abarca el área en donde se encuentran las quebradas de Acha, Chaca, Camarones, Suca, Tana y Tiliviche.

El relleno de esta cuenca comienza, en su extremo norte, con areniscas con intercalaciones de lutitas, conglomerados finos, tobas y calizas conocida como la Formación Azapa. La potencia de los depósitos se hace mayor hacia el este, llegando a superar los 500 m (Vogel y Vila, 1980). Estos depósitos son estratigráficamente equivalentes a las areniscas y lutitas que afloran más al sur, en las profundas quebradas de Chaca, Camarones y Suca, donde alcanzan una potencia superior a los 350 m. Estos últimos pueden interpretarse como las facies distales de un sistema aluvial alimentado desde el este, en el cual sus correspondientes facies proximales están representadas por conglomerados de la Formación Azapa. Sobre los depósitos clásticos proximales de la precordillera yacen discordantemente tobas ignimbríticas de la Formación Oxaya. Hacia el oeste se encuentran también ignimbritas pero de espesores más delgados. Sobre estos cuerpos de tobas del Mioceno la sedimentación continuó con depósitos proximales gruesos en el este y sedimentación más fina de tufitas en las zonas distales del oeste. Posteriormente la sedimentación en

esta área pasa gradualmente a ser lacustre, como lo señalan las capas de margas y diatomitas de la confluencia de las quebradas de Tiliviche y Tana.

4.2. Cuenca del Tamarugal

La Cuenca del Tamarugal se extiende al sur de Huara hasta Cerro Gordo e incluye el área de Pozo Almonte, Pintados y Bellavista (entre los 19° 50'-20° 50'S).

La mayor parte de su relleno está representado por la Formación Altos de Pica. En términos generales consiste en areniscas y conglomerados con intercalaciones de tobas. Sus afloramientos típicos son en las quebradas de la precordillera. Estos depósitos representan las facies proximales del relleno que se extiende hacia el oeste, donde los términos clásticos son más abundantes en detrimento de los depósitos volcánicos piroclásticos. La mayor potencia de estos depósitos se ha registrado a la latitud de Pica (20° 30'S), donde sobrepasan los 700 m tanto en los afloramientos de la precordillera como en los sondeos de la Pampa del Tamarugal. En estos últimos se registran intercalaciones calcáreas de posible origen lacustre que indicarían una evolución en la sedimentación similar a la de la Cuenca de Camarones.

En la localidad típica de la Formación Altos de Pica se han diferenciado tres miembros clásticos y dos de tobas (Galli y Dingman, 1962). Los depósitos basales, consisten en conglomerados y yacen discordantes sobre rocas mesozoicas. Posiblemente el rango de edad de esta formación sea desde el Oligoceno hasta el Pleistoceno.

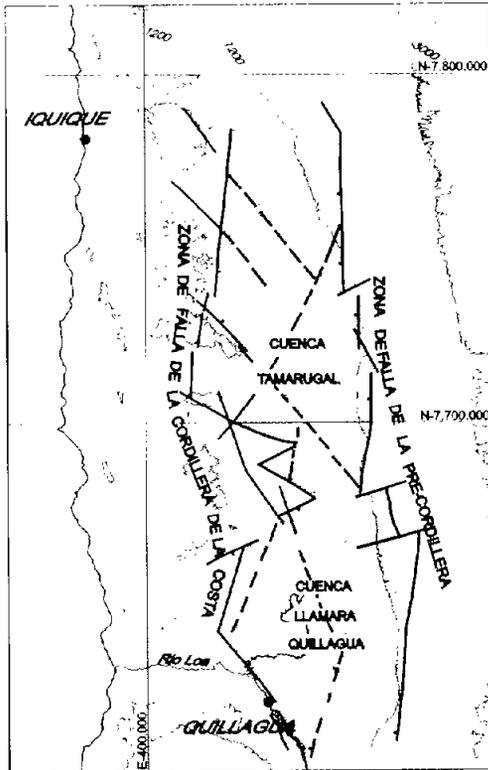
4.3. Cuenca de Quillagua-Llamara

La Cuenca de Quillagua-Llamara se localiza al sur de los 20° 50'S hasta los cerros de La Encañada (21° 50'S).

Los depósitos más antiguos son conglomerados polimícticos con intercalaciones de areniscas y evaporitas, de unos 900 m de espesor de la Formación Sichal. Estos depósitos corresponden a la continuidad lateral hacia el sur de los depósitos clásticos de la Formación Altos de Pica, que de la misma manera que en la Cuenca del Tamarugal, afloran en la precordillera. Este relleno sedimentario de la Cuenca

FIGURA 1

Parte central de Pampa Tamarugal
con las fallas mejor identificadas
de imágenes satelitales



de Quillagua-Llamara se extiende también hacia el oeste gradando a areniscas y lutitas poco consolidadas con intercalaciones evaporíticas. Este conjunto de facies, predominantemente clásticas, representan un dispositivo sedimentario de un sistema deposicional de abanicos aluviales que descienden desde la precordillera y terminan en lagos efímeros, en una cuenca endorreica de ambiente árido. De acuerdo a esto, las condiciones aquí son muy similares al sistema deposicional de la vecina Cuenca del Tamarugal, salvo que en aquella los depósitos piroclásticos son más abundantes y los lacustres son probablemente más restringidos.

Sobre la Formación Sichal y sus equivalentes estratigráficos laterales, descansan nuevos conglomerados que dieron forma al Abanico de Arcas en la parte proximal y sedimentitas lacustres en la parte distal. Esta Formación Quillagua es el resultado de un sistema aluvial que se inició a fines del Mioceno y continuó su

desarrollo durante el Plioceno. Los abanicos aluviales que integraron este sistema deposicional finalizaron en un lago perenne. Este sistema lacustre fue alimentado por cursos fluviales procedentes del sur en la Cuenca de Miraje.

Los depósitos más altos de la serie estratigráfica de esta área consisten en evaporitas y material detrítico predominantemente arenoso, de pocos metros de potencia, que constituyen un nuevo sistema deposicional de ambiente árido precursor de los salares actuales, compuesto por llanuras aluviales, playa-lakes y lagos efímeros que se desarrollaron con anterioridad a la apertura e incisión del río Loa.

4.4. Cuenca de Miraje

La Cuenca de Miraje se extiende desde un umbral del basamento localizado en los Cerros del Tranque ($21^{\circ} 50'S$) hasta el área de Chacance ($22^{\circ} 30'S$).

Esta cuenca de dimensiones mucho menores que las descritas anteriormente está situada en el área de Chacance. Su relleno consiste en algo más de un centenar de metros de depósitos ligeramente consolidados, consistente en areniscas, gypsarenitas y lutitas con intercalaciones de anhidrita y tobas subordinadas de la Formación Batea, que se apoyan sobre el substrato Mesozoico. Esta asociación de facies corresponde a un ambiente de playa-lake desarrollado durante el Mioceno Medio que formaba parte de un sistema aluvial que era alimentado desde su margen oriental. Dichos depósitos se formaron en la zona distales del dispositivo, que consistían en llanuras aluviales asociadas a lagos efímeros. Los depósitos proximales de este sistema aluvial estaban constituidos por sedimentos clásticos de granulometría más gruesa correspondientes al miembro inferior de la Formación El Loa o a la Formación Calama.

5. SECUENCIA ESTRATIGRÁFICA DEL VALLE LONGITUDINAL

La estructura del Valle Longitudinal es en gran medida el resultado de la convergencia de placas que producen un fallamiento de desplazamiento horizontal en paralelo con la trinchera y la formación de cuencas ante-arco

de pliegue sinclinal asociadas y precordillera solevantada (Reutter *et al.*, 1991, Buddin *et al.*, 1992). Dentro de la cuenca se depositaron las secuencias sedimentarias descritas arriba. Conforme al trabajo de Vail *et al.* (1997) y Miall (1996), estas secuencias comprenden un único ciclo de segundo orden de ~35 millones de años, abarcando en edad desde el Eoceno hasta nuestros días y tres ciclos de tercer orden de ~2-10 millones de años cada uno, relacionados con el Oligoceno, Mioceno Inferior a Medio y Mioceno Superior a Pleistoceno. Cada secuencia, independiente del orden, tendió a producir inicialmente sedimentos clásticos gruesos (en la base), produciendo gradualmente material más y más fino (ascendentemente) y las secuencias sucesivas ten-

dieron a hacerse más finas, apuntando hacia una reducción gradual en el suministro y deposición del sedimento. La Tabla 1 resume las tres secuencias estratigráficas superiores del Valle Longitudinal.

Es probable que el control dominante en la secuencia deposicional de tercer orden sea tectónico (Sebrier *et al.*, 1988). Con cada evento tectónico sucesivo el pliegue sinclinal permitió un mayor espacio para el almacenamiento de sedimento, mientras que al mismo tiempo el solevantamiento de la cordillera produjo una mayor erosión y fuentes de sedimento. El control dominante en la secuencia deposicional de segundo orden puede ser climático, debido a la creciente aridez asociada con el solevantamiento de los Andes (Alpers y Brimhall, 1988).

TABLA 1

Resumen de la hidroestratigrafía Terciaria y recursos hídricos en el Valle Longitudinal

Edad Ma	Epoca	Principales formaciones por cuenca				Secuencias	
		Camarones	Tamarugal	Quillagua-Llamara	Miraje	Orden 3	Orden 2
						más grueso	
←	PLEISTOCENO	Las Pampitas	Soledad		Chiu-chiu	S ₃ 3	S ₂ 2
	PLIOCENO	Tiliviche	Altos de Pica	Quillagua	El Loa	S ₃ 2	
MIOCENO	Oxaya	Hilaricos					
36	OLIGOCENO	Azapa	Sichal		Calama	S ₃ 1	
Area del acuífero (km ²)		600	1.700	1.000	300	TOTAL	
Espesor saturado (m)		200	600	500	50		
Porosidad efectiva (%)		3	3	3	3		
Volumen de agua en almacenamiento (km³)		3.6	30.6	15,0	0,5	50	

La interpretación e importancia de dichas secuencias fue desarrollada y reconocida como un resultado de la extensiva exploración petrolera mundial (Allen y Allen, 1990), y es tan solo ahora que los mismos principios pueden aplicarse a la hidrogeología.

6. HIDROLOGÍA DE LA CUENCA DEL VALLE LONGITUDINAL

Las secuencias sedimentarias clásticas del Valle Longitudinal forman una serie de capas acuíferas interconectadas hidráulicamente que pueden llamarse colectivamente *Capa Acuífera de la Pampa del Tamarugal*. Esta capa acuífera es compleja, comprendiendo arenas, gravas y tefra volcánica de características variables de permeabilidad y almacenamiento, intercaladas con arcillas impermeables, evaporitas y unidades volcánicas ignimbríticas. Así, las condiciones de flujo y almacenamiento de las aguas subterráneas fluctúan desde no confinado, a semiconfinado, hasta totalmente confinado.

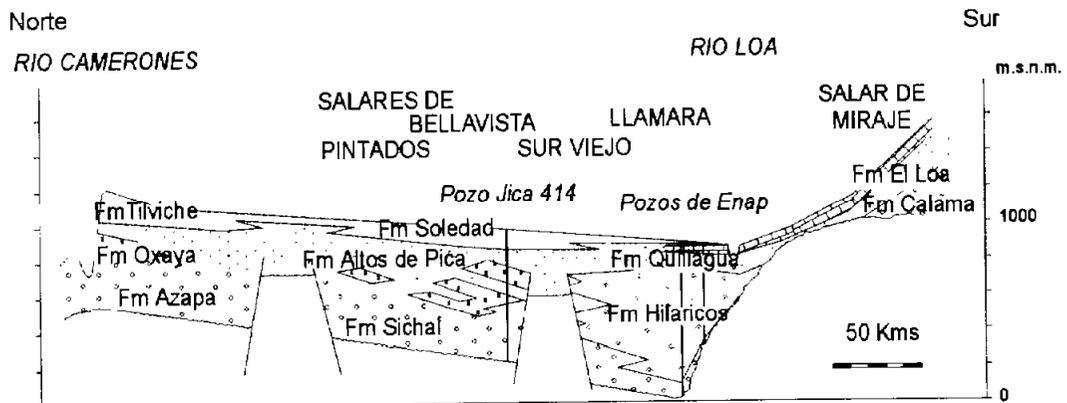
Las Cuencas de Tamarugal, Quillagua, Llamara y Miraje constituyen una unidad hidrológica única a través de la cual pasa todo el drenaje desde la Cordillera hasta el mar vía el río Loa, aunque cantidades significativas se pierden en este recorrido debido a la evaporación y extracción. La parte central y norte de la Cuenca de Camarones representa una unidad hidrológica separada, ya que el drenaje tiene lugar directamente hacia la costa vía una serie de valles fluviales más pequeños.

La morfoestructura del basamento y el predominio creciente de las unidades volcánicas hacia el este son de importancia crítica en la discriminación de estas capas acuíferas y en el control de las vías de flujo y recarga. Dentro de las capas acuíferas, las secuencias estratigráficas son críticas en el control de los parámetros físicos, como los coeficientes de permeabilidad y almacenamiento.

La evolución hidrológica de la Capa Acuífera de la Pampa del Tamarugal es también compleja y larga. Durante la deposición de las secuencias sedimentarias Terciarias de los sistemas fluviales que drenaban de la cordillera, cantidades considerables de agua deben haber sido arrastradas en los sedimentos. Dicha agua probablemente ha sido evacuada hace mucho, ya que no se reconocen actualmente aguas connatas. Durante el Terciario Tardío y Cuaternario, una serie de lagos endorreicos con salinidades variables llenaban el Valle Longitudinal (Bao *et al.*, 1999), sugiriendo la existencia de un equilibrio entre recarga y evaporación. Después de la apertura del río Loa al mar (durante el Plio-Pleistoceno) la descarga excedió la recarga y los lagos se secaron. No obstante, la recarga continuó por la infiltración del agua de superficie a través de los abanicos aluviales al pie de la precordillera y posiblemente a través de vías de agua subterránea más profundas (Margaritz *et al.*, 1990). Las determinaciones de edad del agua subterránea basadas en la datación radiocarbónica (JICA, 1995, Suzuki *et al.*, 1981) tienden a concentrarse alrededor de 10-14.000 años BP (fase Tauca glacial tardía, Hast-

FIGURA 2

Esbozo sección geológica del Valle Longitudinal



enrath y Kutzbach, 1984), 3-7.000 años BP (fase húmeda del Holoceno Temprano, Messerli *et al.*, 1993), y post 1.000 años BP (efectivamente agua reciente). Esto sugiere decididamente una serie de eventos de descarga pulsante asociados con variaciones paleoclimáticas Cuaternarias. Hay evidencia suficiente (Grilli *et al.*, 1999, Houston, en prensa, Houston, en preparación) para sugerir que al menos algo de recarga de agua subterránea está ocurriendo bajo las condiciones climáticas actuales, probablemente concentrada en eventos climáticos extremos con períodos de recurrencia de décadas y siglos. Puede especularse que, en promedio, se recargan regular y significativamente más de 1.000 l/s en la Capa Acuífera de la Pampa del Tamarugal, que es el monto aproximado estimado por la DGA (1987) y JICA (1995), pero se requiere urgentemente de la evaluación detallada y refinamiento de esta cifra.

En nuestros días no es posible subdividir la Capa Acuífera de la Pampa del Tamarugal en subunidades relativamente homogéneas, porque no hay la información suficiente, pero sí es posible, no obstante, obtener una estimación general del volumen de agua subterránea en almacenamiento.

Las estimaciones de volumen de la capa acuífera (vea la Tabla 1) se hacen consultando mapas geológicos e interpretando imágenes satelitales para determinar áreas, y perforando pozos y haciendo evaluaciones sísmicas para determinar profundidades. Es posible preparar mapas de profundidades y curvas de nivel de la capa freática para aproximadamente 300 pozos (JICA, 1995) conjuntamente con cotas de intersección superficie-agua subterránea, permitiendo así la determinación del volumen de la capa acuífera saturada total. El coeficiente de almacenamiento promedio (porosidad efectiva) para las capas acuíferas bien desarrolladas dentro de la Cuenca del Tamarugal es, según JICA (1995), del 30%. Esto deberá factorizarse descendientemente hasta un estimado 3% para compensar las zonas improductivas o malamente productivas. En base a estos datos, el volumen total de agua almacenada en la Capa Acuífera de la Pampa del Tamarugal es de 55 kilómetros cúbicos.

Incluso si estas estimaciones están erradas en un 50%, hay una cantidad enorme de agua, la suficiente para abastecer a Iquique y Antofagasta por más de 1.000 años, o la totalidad de la Primera y

Segunda Región por más de 100 años, y esta disponibilidad representa un recurso estratégico nacional.

7. CONSIDERACIÓN DE LOS CRITERIOS A SER USADOS PARA EVALUAR LOS RECURSOS DE AGUAS SUBTERRÁNEAS FÓSILES

El término "agua subterránea fósil" es emotivo, evocando ideas de un fluido raro y precioso que jamás debe usarse. Sin embargo, el término es relativo, ya que la presencia o ausencia de recarga a menudo varía conforme a escalas de tiempo basadas en siglos o milenios. Resulta por lo tanto crítico evaluar cualquier recurso en una base caso por caso de una manera que permita una consideración objetiva de todos los aspectos pertinentes.

Cuando es evidente que hay poca o ninguna recarga bajo las condiciones climáticas actuales, se hace necesario un nuevo conjunto de criterios para su evaluación con respecto al uso. Tales criterios deberán incluir una evaluación de los siguientes factores:

1. Consideración del tamaño del recurso en relación a la demanda potencial. Si el recurso tiene el potencial para satisfacer la demanda por ~50 años sin recarga, entonces quizás deba fomentarse su uso, sujeto a las limitaciones debido a los impactos sobre los usuarios existentes y el medio ambiente.
2. Disponibilidad de futuras fuentes alternativas. Si el recurso está dentro de una distancia de abastecimiento económico de futuras fuentes alternativas (por ejemplo, desalinación del mar), entonces deberá haber menos preocupación respecto de las actuales extracciones.
3. Futuras demandas alternativas potenciales. ¿Conlleva la demanda actual un beneficio económico importante para el país o región? o, a la inversa, ¿cuáles serían los efectos sobre la región si no se permitiera la extracción? Donde el desarrollo de una fuente de aguas subterráneas fósiles trae consigo beneficios sociales y económicos de largo plazo, su extracción deberá tomar en cuenta este hecho.
4. Consideración de la calidad del agua. ¿Es apropiada para el consumo humano o pro-

ducción agrícola? Cuando la calidad del agua es mala, deberá haber menos necesidad de conservar el recurso para su uso futuro.

5. Efectos. El impacto de cualquier extracción deberá ser la consideración principal al permitir o rechazar el desarrollo. Claramente, no deberá haber menoscabo de terceros y no deberán haber efectos negativos significativos sobre el medio ambiente. Hay, no obstante, una excepción a esto: donde el desarrollo puede proveer abastecimientos de compensación adecuada a su propio costo.

Algunos de estos criterios son técnicos y requieren de la aplicación de las técnicas más rigurosas y modernas para obtener respuestas sólidas. Otros criterios son de naturaleza política y requieren que el gobierno decida respecto de una política económica y de abastecimiento de agua para el país y regiones.

8. CONCLUSIÓN: DEBEN DESARROLLARSE POLÍTICAS PARA UNA GAMA MÁS AMPLIA DE ESCENARIOS QUE LA ACTUALMENTE DISPONIBLE

El Código de Aguas no prohíbe estrictamente el otorgamiento de derechos de aprovechamiento sobre aguas subterráneas almacenadas. Sin embargo, ya que los derechos de agua se otorgan a perpetuidad, se ha asumido que los derechos de agua solo pueden otorgarse sobre recursos hídricos renovables.

Puesto que se están descubriendo constantemente nuevos recursos hídricos subterráneos, que no se conoce bien la extensión y magnitud de la recarga, la cual puede cambiar con el tiempo, y que nuevas técnicas pueden aumentar la disponibilidad del recurso natural, es imposible para el Código de Aguas o DGA definir definitivamente un conjunto de recursos disponibles finitos.

Es por ello esencial que los derechos de agua legales sean considerados separadamente de los recursos disponibles.

Se requieren nuevas políticas que puedan utilizar lo mejor del conocimiento y tecnología disponibles en cualquier momento dado para situar los recursos disponibles en el contexto de un desarrollo socioeconómico óptimo.

Por analogía, otros recursos naturales como el cobre y el petróleo, los que por definición

constituyen recursos nacionales estratégicos no renovables, tienen también derechos de extracción adjuntados, derechos que son otorgados a perpetuidad y que pueden transarse en el mercado libre sujetos solo a los controles de la política gubernamental. Es más, con la desalinización a bajo precio en el horizonte, el agua enfrenta el futuro en una posición mucho más sólida que el cobre como conductor eléctrico o que el petróleo como fuente de energía.

REFERENCIAS

- ALLEN, PA, y ALLEN, JR. 1990. *Basin Analysis: Principles and Applications*. Blackwell.
- ALPERS, CN, y BRIMHALL, GH. 1988. Middle Miocene climatic change in the Atacama Desert, northern Chile: evidence from supergene mineralization at La Escondida. *Geol. Soc. Amer. Bull.* 100: 1640-1656.
- BAO, R, SÁEZ, A, SERVANT-VIDRAY, S, Y CABRERA, L. 1999. Lake-level and salinity reconstruction from diatom analyses in Quillagua Formation (late Neogene, Central Andean forearc, northern Chile). *Palaeogeog., Palaeoclimat. & Palaeoecol.* 153: 309-335.
- BUDDIN, TS, STIMPSON, IG, Y WILLIAMS, GD. 1992. North Chilean forearc tectonics and Cenozoic plate kinematics. *Tectonophysics.* 220: 193-203.
- DGA, 1987. *Balance Hídrico de Chile*. Dirección General de Aguas.
- DOMENICO, PA, 1972. *Concepts and models in Groundwater Hydrology*. McGraw-Hill.
- GALLI, O. 1967. Piediplain in northern Chile and the Andean uplift. *Science* 158: 653-655.
- GALLI, O, AND DINGMAN, RJ. 1962. *Cuadrángulos Pica, Alca, Matilla, y Chacarilla*. SERNAGEOMIN.
- GRILLI, A, AGUIRRE, E, DURÁN, M, TOWNSEND, F, Y GONZÁLEZ, A. 1999. Origen de las aguas subterráneas del sector Pica-Salar del Huasco, Provincia de Iquique, I Región de Tarapacá. *XII Congreso de Ingeniería Sanitaria y Ambiental*, Antofagasta.
- HASTENRATH, S, Y KUTZBACH, J. 1985. Late Pleistocene climate and water budget of the South American Altiplano. *Quat. Res.* 24: 249-256.
- HELWEG, OJ, 1985. *Water resources planning and management*. Wiley.
- HOUSTON, J. in prep. The 2000 peak flow in the Quebrada Chacarilla and the implications for groundwater recharge.
- HOUSTON, J. 2000. Temporal and spatial variations in rainfall and evaporation in northern Chile and the implications for water resources. *Jour. Hydrol.* submitted.
- JENSEN, PA. 1992. *Las Cuencas aluvio-lacustres Oligoceno-Neógenas de la región de ante-arco de Chile Septentrional, entre los 19° y 23° sur*. Unpubl. PhD thesis. Univ. de Barcelona.

- JICA. 1995. *The study on the development of water resources in northern Chile*. Unpubl. Rept. Pacific Consultants International. Ministerio de Obras Públicas.
- MARGARITZ, M, ARAVENA, R, PEÑA, H, SUZUKI, O, Y GRILLI, A. 1990. Source of groundwater in the deserts of northern Chile: evidence of deep circulation of groundwater from the Andes. *Ground Water* 28: 513-517.
- MESSERLI, B, GROSJEAN, M, BONANI, G, BURGI, A, GEYH, M, GRAF, K, RAMSEYER, K, ROMERO, H, SCHOTTERER U, SCHREIER, H y VUILLE, M. 1993. Climate change and natural resource dynamics of the Atacama Altiplano during the last 18,000 years: a preliminary synthesis. *Mount. Res. & Dev.* 13: 117-127.
- MIALL, AD. 1996. *The Geology of Fluvial Deposits: sedimentary facies, basin analysis and petroleum geology*. Springer.
- MORTIMER, C, FARRAR, E, y SARIC, N. 1974. K-Ar ages from Tertiary lavas of the northernmost Chilean Andes. *Geol. Rund.* 63: 484-490.
- REUTTER, KJ, SCHEUBER, E, y HELMCKE, D. 1991. Structural evidence of orogen-parallel strike slip displacements in the precordillera of northern Chile. *Geol. Rund.* 80: 135-153.
- SCHEUBER, E, HAMMERSCHMIDT, K, y FRIEDRISCHSEN. 1995. 40 Ar/ 39 Ar and Rb-Sr analyses from ductile shear zones from the Atacama fault zone, Northern Chile, and the age of deformation. *Tectonophysics* 250: 61-87
- SUZUKI, O, SILVA, C, FRITZ, P, y SALATI, E. 1981 *Isotope Hydrology of Groundwater in the Pampa Tamarugal*. Unpubl. Rept. Comisión Chilena de Energía Nuclear.
- TODD, DK, 1959. *Ground Water Hydrology*. Wiley.
- VAIL, PE, MITCHUM, RM, Y THOMPSON S. 1977. Relative changes of sea level from coastal onlap. In *Seismic Stratigraphy - Applications to Hydrocarbon Exploration* (ed. CE Patton) *Amer. Assoc. Petrol. Geol. Mem.* 26: 63-82.
- VOGEL, S, y VILA, T. 1980. *Cuadrángulo Arica y Poconchile*. SERNAGEOMIN