

EXISTENCIA DE AGUA EN LA IIa REGION DE CHILE: INTERROGANTES E HIPOTESIS

P. POURRUT¹ y grupo UNIRHI¹

Résumé - Malgré l'aridité du climat et l'accroissement accéléré de l'extraction, on n'observe pour l'instant aucune diminution notable des quantités d'eau exploitées dans la IIème Région du Chili. Les résultats d'études récentes, particulièrement celles relatives à de possibles modifications climatiques, permettent dans une certaine mesure d'apporter quelques éclaircissements à cette apparente contradiction.

Resumen - A pesar de sus condiciones climáticas áridas y del fuerte incremento de las extracciones, no se observa ninguna disminución del recurso agua explotado en la IIa Región de Chile. Los resultados de nuevos estudios, en especial aquellos referente a posibles modificaciones climáticas, permiten explicar en parte esta aparente antinomia.

INTRODUCCION

Cuando se considera la extrema escasez de precipitaciones que impera en todo el espacio comprendido entre la franja litoral y la puna andina, no es de extrañar si al habitante de la IIa Región de Chile se le ocurre preguntarse sobre la procedencia del agua que, sin mayor restricción aparente, va brotando de las llaves de su casa en Calama o en Antofagasta. *¿Cómo se forma, de dónde viene, cómo circula y cuánto tiempo demora en su tránsito hasta los sitios donde se la puede captar para el bien de la comunidad?* Estas son algunas de las incógnitas que aquí se pretende resolver, desde luego en forma parcial y preliminar. Con tal propósito, una vez expuestas algunas consideraciones referentes a la problemática general del recurso agua y después de describir brevemente los grandes rasgos geográficos de la zona porque son elementos de referencia imprescindibles para elaborar la lógica de la presente comunicación, ésta se propone:

- develar la problemática de la situación hídrica regional, apoyándose en distintos resultados recientemente obtenidos;
- aportar con algunos elementos de explicación a través de la expresión de hipótesis basadas en una interpretación de las condiciones climáticas vigentes en épocas del pasado.

NORMAS QUE RIGEN LA DISPONIBILIDAD NATURAL DEL AGUA

En las partes del planeta donde existen climas con totales anuales de lluvia apreciables, no es muy complejo contestar las preguntas arriba planteadas y las disponibilidades en aguas, tanto superficiales como subterráneas, dependen de los valores alcanzados por los elementos de la ecuación del *balance hídrico*. En otras palabras, en un área considerada, se equilibran las entradas (también llamadas *función de producción*, que la conforman en su gran mayoría las precipitaciones) y las salidas (o *función de restitución*, que la constituyen la escorrentía superficial, la evapotranspiración y la infiltración). Durante intervalos de tiempo adecuados, por ejemplo a escala anual, dicho balance se va reproduciendo de manera cíclica, pese a las variaciones aleatorias introducidas por las precipitaciones, lo que se traduce en una constante renovación de las

¹ Convenio UCN-ORSTOM. Universidad Católica del Norte. Casilla 34, Correo 2, Antofagasta, Chile

cantidades en juego. Se acostumbra considerar que el recurso utilizable debe ser de la misma magnitud que la proporción renovable.

Como es lógico, la fracción de la función de producción que no retorna inmediatamente o a corto plazo a la atmósfera se descompone en los dos elementos de la función de restitución que van a constituir las reservas de agua:

- escorrentía superficial que corre en los drenes de la red hidrográfica;
- aguas infiltradas que alimentan las formaciones geológicas porosas del subsuelo y circulan en las redes profundas o fluyen en las napas acuíferas subterráneas.

Debe agregarse que dichos recursos, además de estar íntimamente relacionados con la función de producción (características de las precipitaciones), dependen también de la *función de transferencia* que constituye la interfaz entre entradas y salidas. En efecto, las cantidades de agua en tránsito y la velocidad de los flujos tienen una vinculación estrecha con las propiedades del suelo y del subsuelo: textura, porosidad, fracturamiento, grado de heterogeneidad lateral, etc...

EL ENTORNO GEOGRAFICO DE LA SEGUNDA REGION, PUNTO REFERENCIAL Y FACTOR CONDICIONANTE

Se intuye del capítulo anterior que el ámbito pluvio-climático y el contexto geodinámico son los agentes que condicionan la formación, localización, importancia y calidad del potencial hídrico.

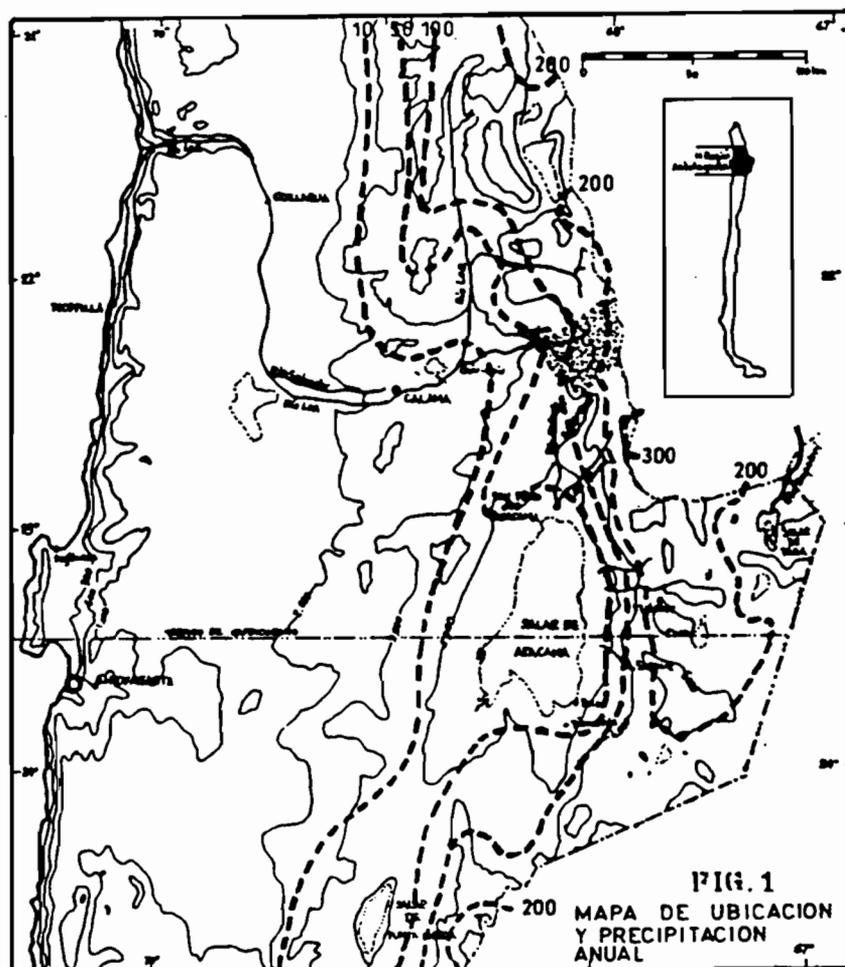
Marco pluviométrico

Son tres las causas principales de la aridez climática de la región.

- 1 - Aspecto específico de la circulación general de la atmósfera, la región se encuentra casi permanentemente bajo la influencia del *Anticiclón del Pacífico Sur*, alimentado por el descenso de masas de aire frío y seco originado en latitudes ecuatoriales; como consecuencia, el tiempo es muy estable y caracterizado por altas presiones barométricas y cielos despejados;
- 2 - La proximidad de la *Corriente de Humboldt*, con aguas frías procedentes de la Antártica, disminuye la evaporación de las aguas superficiales y genera escasas masas de aire relativamente frío y poco húmedo. Cuando ingresan al continente, no existen los requisitos termodinámicos de enfriamiento requeridos para precipitar y no se producen lluvias. Caso especial, ciertas condiciones topográficas de altitud y exposición de las vertientes inducen la existencia de capas de estratocúmulus que, asociadas con condiciones de inversión térmica a una altura de 800 msnm aprox., generan neblinas llamadas *camanchacas*; su impacto es local y se limita a zonas costeras de poca superficie;
- 3 - Las alturas elevadas de la *Cordillera de los Andes* contribuyen para aislar su vertiente pacífica del resto del continente suramericano. Esta formidable barrera aminora notablemente la influencia de la continentalidad ya que obstaculiza el ingreso de las masas de aire de la vertiente atlántica cuya acción logra imponerse durante el verano austral, entre diciembre y abril. Como esta época coincide con la posición más al sur del sol, la radiación solar alcanza sus valores extremos; la evapotranspiración es máxima en todo el territorio del Chaco paraguayo y argentino, lo que genera masas ascendentes de aire húmedo y caliente que se ven empujadas hacia el oeste por el centro activo de altas presiones del Atlántico.

Provocan precipitaciones y tormentas y las cúspides andinas se ven entonces cubiertas por el manto de nieve característico del *invierno boliviano o altiplánico*.

La fig.1 presenta la situación general de la zona estudiada así como las líneas de igual precipitación anual. Se debe notar, en especial, que todo el territorio ubicado bajo los 3000 m.s.n.m. está con lluvias inferiores a 10 mm y que los valores indicados para la zona altiplánica, particularmente las isoyetas 200 y 300 mm, resultan casi exclusivamente de extrapolaciones.



Contexto geodinámico

Las condiciones geológicas y la morfotectónica definen los distintos grados y tipos de permeabilidad: porosidad derivada de la litología, micro-fracturamiento y macro-fallamiento. En el marco geotectónico global, la región estudiada es parte del margen continental activo del continente suramericano. La convergencia dinámica entre la placa oceánica Nazca que subducta bajo su borde occidental es responsable de la *notable actividad sísmica y del volcanismo activo* que caracteriza la porción oriental. Se ve también traducido, a nivel estructural, por *importantes fallamientos paralelos de orientación aproximada norte-sur* y, debido a esfuerzos en compresión o en distensión, por una tectónica de bloques alzados y fosas de hundimiento que definen diferentes compartimentos morfoestructurales. Es posible distinguir seis unidades fisiográficas principales de orientación norte-sur (BORIC, DIAZ, MAKSAEV, 1990), ubicándose las dos primeras y gran parte de la tercera fuera de los límites del perímetro estudiado: - 1) la *Cordillera*

de la Costa - 2) la *Depresión Intermedia* - 3) la *Cordillera de Domeyco* (Precordillera) - 4) las *Cuencas Intramontanas*, depresiones que separan la Precordillera de la Cordillera de los Andes; las principales son la cuenca superior del río Loa, la de su afluente el río Salado y la del Salar de Atacama; 5) la *Cordillera de los Andes*, cordón volcánico activo con estrato-volcanes cuyas altitudes frecuentemente sobrepasan 6000 msnm; 6) el *Altiplano* (Puna), relieve relativamente suave con una altitud variable entre 4000 y 4400 msnm y un sistema hidrográfico endorreico; está sólo presente en el extremo oriental de la región y se extiende hacia el este en territorio argentino y boliviano.

Ya que la gran mayoría de las rocas aflorantes, plutones y volcanitas, son de origen ígneo relativamente reciente, se da énfasis al *período que abarca desde el Terciario Medio hasta el Cuaternario*, cuando el frente magmático pasa a ocupar la posición actual y forma un cordón volcánico del que nació la Cordillera Principal de los Andes. Es importante citar "*.. durante este período, imperó un clima hiperárido, con escasa erosión, aunque se formaron extensas cubiertas aluviales y algunos depósitos lacustres y salinos, que constituyen las actuales planicies (pampas) y salares localizados en la Depresión Intermedia y Cuencas Intramontanas*" (BORIC, 1990).

DISPONIBILIDAD ACTUAL DE AGUA EN LA II REGION - PROBLEMATICA

Deducciones sugeridas por el entorno ambiental

Si uno se fundamenta en la situación y teoría admitida, evocadas en II.1 y II.2, se deduce:

- en cuanto a la función de producción, las precipitaciones conocidas son muy escasas y el ámbito desértico impera desde varios millones de años;
- en lo que se refiere a la función de transferencia, la secuencia estratigráfica existente muestra muy pocas formaciones detríticas, quizás porque los trabajos geológicos han tenido un enfoque esencialmente económico (vocación minera de la región), con toda la confidencialidad que eso implica en la difusión de los resultados: sondajes, etc.... Además, pese a tener claro el panorama estructural a escala regional, los mapas no indican numerosas evidencias de fallamientos locales.

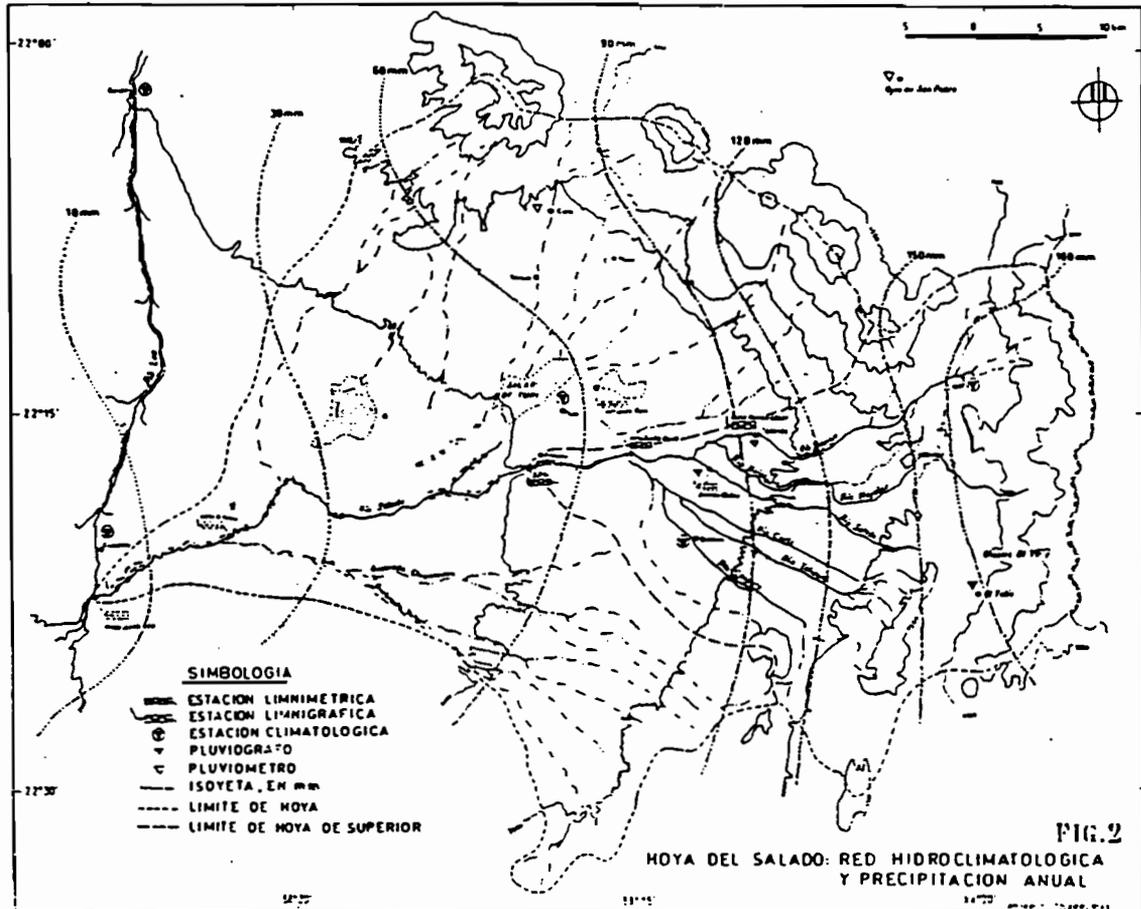
Aparentemente, las condiciones climáticas no están dadas para conformar escorrentías o infiltraciones de consideración ya que los parámetros de sublimación y evapotranspiración son los más favorecidos. Por otra parte, al referirse a la información geológica tradicional existente, las condiciones geodinámicas no parecen propicias para el almacenamiento y la circulación de las aguas. Es obvio que *no es muy alentador el panorama presentado por las condiciones naturales vinculadas con la formación del agua y de sus reservas.*

Balance de agua en la cuenca del río Salado

Debido a su interés por la producción de agua, las cuencas hidrográficas del río Siloli y del río Salado (de ésta se está extrayendo 1560 l s^{-1} para el agua potable y la gran minería) tienen instaladas antiguas redes de observación hidroclimatológica.

Con el fin de establecer su balance hídrico, se ha analizado en detalle (KOHNEKAMP, 1993, POURRUT, COVARRUBIAS, 1994) la información existente desde 1968 en el río Salado. La hoya (fig. 2) se ubica sobre los 3100 m de altitud y la zona de interés que controla el sistema cordillerano de producción de agua (estación de Ayquina) tiene una superficie de 784 km^2 . El total pluviométrico anual aumenta con la altura y varía entre 50 mm y alrededor de 200 mm, siendo elevadísima la irregularidad interanual. Un 90% de las precipitaciones están concentradas

de diciembre a marzo, con lluvias diarias que raras veces pasan de 40 mm. Del 13 al 26 de febrero de 1977 se ha registrado un evento de frecuencia rara: 239 mm en Toconce, 223 mm en Linzor y 160 mm en Caspana, generando un pico de crecida de $370 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$. Entre 1975 y 1990, los módulos específicos anuales fluctúan alrededor de $2 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$, con extremos mensuales entre 25 y $1,5 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$.



El cuadro 1 presenta los valores anuales de los parámetros de producción y de restitución. Permite poner de relieve dos resultados poco comunes:

- excepto cuando ocurren eventos anómalos, tal como en febrero del año 1977, *la lámina escurrida es poco variable, con valores alrededor de 50 a 60 mm anuales. Parece independiente de las precipitaciones que caen en la cuenca;*
- *la lámina escurrida de los años secos es proporcionalmente elevada, hasta igualar o superar el valor de las precipitaciones.*

Cuadro 1 - BALANCE HIDRICO PRELIMINAR - HOYA SUPERIOR DEL RIO SALADO

AÑO HIDR.	PRECITACION (mm)	ESCORRENTIA (mm)	DEFICIT (mm)	COEFF. ESC. (%)
75-90	134	70	64	52.2
75-76	215	62	153	28.8
76-77	277	120	157	43.3
77-78	64	56	8	87.5
78-79	94	51	43	54.3
79-80	48	55	-7	114.6
80-81	120	60	60	50.0
81-82	37	54	-17	145.9
82-83	87	55	32	63.2
83-84	294	62	232	21.1
84-85	172	60	112	34.9
85-86	129	55	74	42.6
86-87	239	58	181	24.3
87-88	53	53	0	100.0
88-89	132	59	73	44.7
89-90	41	54	-13	131.7

Problemática referente a la explotación del agua

Los resultados obtenidos en la cuenca del río Salado confirman las conclusiones preliminares deducidas de las condiciones del ámbito geográfico. En primer lugar, *la gran escasez del recurso agua, en términos de cantidad*. En segundo lugar, la participación predominante, en los flujos de la red de drenaje, de aguas subterráneas de origen remoto. Ello evidenciaría que, en la actualidad, *la recarga natural es extremadamente limitada*, fenómeno que podría también ser asociado con un elevadísimo tiempo de tránsito subterráneo.

Sin embargo, debe resaltarse un aspecto peculiar de la distribución del recurso en el tiempo, que se traduce por un *efecto de atenuación o "laminación" materializada por la constancia de los aportes, sin duda benéfica, que viene a contraponerse a la irregularidad pluviométrica*. Hasta tal punto que pareciera que la ecuación del balance hídrico no se relacionaría con una ciclicidad de período anual y tendría una oscilación de mayor duración.

En conclusión, es posible identificar una *aparente contradicción*. En efecto, pese a la muy reducida e irregular alimentación de la red hidrográfica superficial así como a la escasez de la recarga natural del sistema subterráneo, pese al fuerte incremento de su extracción en las zonas de altura debido a una demanda explosiva, las cantidades de agua explotadas año tras año desde hace mucho tiempo no se ven afectadas por ninguna disminución.

¿ Seguirán así o se agotarán las fuentes ? ¿ Existen algunos argumentos explicativos para esclarecer la realidad del presente y augurar del futuro?

ELEMENTOS DE JUICIO: APORTE DE ESTUDIOS RECIENTES

Por distintas razones (incremento de la producción regional o interés científico), muchos son los estudios que sobre el tema se están desarrollando en la actualidad. Es imposible establecer aquí una lista exhaustiva de todas las instituciones que se esfuerzan en entender los mecanismos que, tanto en el tiempo como el espacio, rigen las variaciones climáticas y la constitución del recurso agua. Se puede citar al Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile, a la Comisión Chilena de Energía Nuclear, a la Dirección General de Aguas, a la cooperación científica entre la UCN y ORSTOM de Francia, a la Universidad de Paris Sud-Orsay, al Weizmann Institute

of Science of Israel, a la Universidad de Berne en Suiza, a la Universidad de Erlangen en Alemania, entre otros, así como a programas mundiales sobre los cambios climáticos: IGBP, PAGES, PEP, Paleomonzón, etc. Sería también presuntuoso pretender ofrecer un panorama completo del estado de avance de las distintas investigaciones que abarcan campos y técnicas tan diversas como las de análisis isotópicos y de radiocarbón, palinología, paleolimnología, hidrología, arqueo-antropología, teledetección, etc.

Entre los resultados ya obtenidos, la mayoría con carácter provisional, *algunos vienen a fortalecer la idea de un recurso de agua con poca esperanza de futuro, otros dibujan un cuadro más optimista* y contribuyen a explicar la aparente contradicción identificada en el subcapítulo anterior. Esta diferencia constituye el guión de la presentación que de dichos resultados se hace a continuación, atribuyéndose a todos ellos, de manera arbitraria y sin opinar, el mismo grado de confianza.

Expectativas pesimistas

Fración de tritio en las aguas - Es de subrayar (MESSERLI, 1993, - estudios UCN/ORSTOM) que los análisis isotópicos demuestran la casi ausencia de tritio ^3H en toda la red hidrográfica regional, particularmente en el sistema de drenaje del río Loa y en las fuentes altas que dan nacimiento a sus principales afluentes. Por ende, *la edad de las aguas supera los 50 años* y su origen tiene que ser esencialmente subterráneo. Este resultado puede reflejar una muy escasa o nula infiltración con ausencia de recarga natural actual. Parece indicar que *las aguas son fosiles* y que el tiempo de tránsito es elevadísimo. Esta afirmación conlleva un sinnúmero de problemas para la explotación futura del recurso.

Proceso de cambio climático actual y/o reciente - a) En el transcurso de los últimos 20-30 años, se ha evidenciado en el Chile Central un cambio de

los regímenes térmicos (incremento de las temperaturas) y de precipitaciones (disminución de los totales anuales y del número anual de días con lluvia), traduciéndose por la elevación del límite de las nieves (isoterma $0\text{ }^\circ\text{C}$) en alrededor de doscientos metros. Dicha afirmación (Reinaldo BÖRGEL, Pontificia Universidad Católica de Santiago, comunicación personal) se ve en gran parte comprobada por las imágenes satelitales del último decenio: ellas muestran que las cubiertas de nieve observadas ocupan, en relación con lo esperado, un espacio geográfico menor durante un menor tiempo. En en Norte, pese a la ausencia de registros, algunas apreciaciones cualitativas son valiosas como aquella referente al volcán Licancabur" ...Tal agua pudo haber sido utilizada en algunos cortos períodos del año en los meses de octubre, noviembre y diciembre, ya que en los meses anteriores está completamente congelada... (BARON, REINHARD, 1981)".

b) Los mecanismos de la circulación atmosférica podrían en realidad ser distintos del esquema presentado en II.1, alinea 3, y los análisis isotópicos (Deuterio ^2H y Oxígeno ^{18}O) efectuados en precipitaciones líquidas y sólidas parecen indicar que la influencia oriental no se limita únicamente al período del invierno boliviano, además de ser, quizá, preponderante en relación con la influencia pacífica (tesis pendientes para confirmarlo o negarlo).

En conjunto, todos los resultados y observaciones arriba indicados apuntan hacia una neta disminución de la alimentación de los sistemas hídricos superficiales y subterráneos.

Expectativas optimistas

Una *nueva interpretación paleoclimatológica* se contrapone al concepto admitido de una hiper-aridez vigente desde el Mioceno, teoría que en gran parte se ha sustentado en el hecho que la Depresión Intermedia constituyera el nivel de base de los sistemas de drenaje y que éstos no han tenido la capacidad para abrirse un camino hasta el océano a través de la barrera topográfica de la Cordillera de la Costa. La nueva interpretación propuesta se ubica a dos escalas de tiempo pero, en ambos casos, se refiere a *la existencia de condiciones mucho más húmedas* que en el presente. Vale subrayar que su impacto es doble:

- a nivel de la existencia de procesos de erosión hídrica que concurren hacia la *constitución de potentes formaciones detríticas*, mecanismo favorecido por las distintas fases del levantamiento de los Andes. De esta manera, quedan constituidos grandes reservorios subterráneos, a veces intercalados entre estratos volcánicos impermeables;

-a nivel de la posibilidad de *alimentar dichos reservorios y constituir reservas de agua*.

Condiciones pluvio-climáticas desde el Terciario Medio - Lo que se propone es una modificación sustancial en cuanto al momento cuando empezaron en imperar las condiciones áridicas, probablemente en la época posterior al Plioceno. Apoyándose en evidencias morfológicas y geológicas encontradas en el terreno, se presenta a continuación un esquema morfodinámico coherente.

El punto de partida se ubica en el Oligoceno-Mioceno Inferior, período que marca una reducción en la intensa actividad volcánica del Cretaceo Superior-Eoceno. Se reactivan los *procesos de erosión-sedimentación*, con la depositación de secuencias continentales como conglomerados, brechas, areniscas y limolitas. Las características de estas formaciones indican que ellas son el producto de una intensa sedimentación en la cual el mecanismo de abrasión y transporte corresponde a sistemas fluviales (excepcionalmente a corrientes de barro). Se puede afirmar que la reanudación de procesos de este tipo es el producto de dos fenómenos simultáneos: alzamiento del nivel de referencia y presencia de un potente agente erosivo. El levantamiento se explica muy bien por resultar de la fase orogénica Incaica, a principios del Oligoceno; contribuye en la formación del sistema de fallas y bloque alzado de la Cordillera de Domeyko y coincide con un solevantamiento paulatino de la región oriental e inclinación hacia el oeste, lo que BÖRGEL (comunicación personal, 1993) llama *peneplanicie terciaria*. La potencia de las formaciones depositadas en relación con el tiempo, al igual que la amplitud y extensión de los sistemas hidrográficos, si bien se explican en parte por la búsqueda del perfil de equilibrio de la red de drenaje y divagación lateral de los cauces en el momento de los reajustes tectónicos, también implican necesariamente la existencia de un clima notablemente lluvioso. Este episodio queda extremadamente bien evidenciado al cabo de la etapa geodinámica posterior del Mioceno, cuando un intenso fallamiento paralelo de dirección norte-sur recorta estos antiguos sistemas de drenaje y grandes valles con distintos niveles de terrazas. Esta tectónica desarrolló también "pilares y fosas tectónicas en compresión... (MAKSAEV, 1979)" y no cabe duda que éstas, beneficiándose de condiciones climáticas suficientemente húmedas, han dado paso a la formación de lagos como lo muestran la presencia de rocas sedimentarias (calizas, areniscas calcáreas) y sedimentos lacustres (diatomitas) en numerosos puntos de la región, con potencias hasta decamétricas.

Viene el período Plioceno-Holoceno durante el cual se afirma que la sedimentación detrítica no fue muy importante en la región (BORIC, 1990), opinión discutible pero es verdad que el mayor evento de la época es la extensa actividad volcánica cuyos productos (ignimbritas,

piroclastos y estrato-volcanes) corresponden a las unidades más extensas. Después, un rasgo primordial resulta de la concomitancia entre actividad volcánica y glaciaciones, que condiciona la formación de numerosos flujos de lodo y explica la gran heterogeneidad (en las formas y tamaños de los bloques) así como la amplia extensión de los depósitos con características generalmente aluviales o a veces aluvio-laháricas. Es también probable la contribución de dicho fenómeno en la producción de aguas sobresaturadas en sales que, una vez almacenadas y después evaporadas (empieza el clima árido) en cuencas endorreicas de origen tectónico o volcánico, pueden ser uno de los procesos de formación de los salares.

Como ejemplo de esta interpretación, dos trabajos de tesis de grado desarrolladas en el marco del convenio UCN-ORSTOM han identificado, a una altitud mayor de 3.000 msnm, nuevas y potentes series detríticas. La una, en el sector de los cerros de Ayquina, es miopliocénica y constituida de gravas, areniscas y conglomerados (CALDERON, 1994). La otra, intercalada entre dos flujos de lava en el cauce superior del río Loa, está compuesta esencialmente de areniscas y grauvacas (GONZALEZ, tesis en curso). En fin, no se puede pasar por alto que el dibujo de las redes de drenaje obedece a controles estructurales, frecuentemente ocultos bajo las formaciones superficiales, así como a fenómenos de captura principalmente debido a la erosión regresiva como en el caso del río Loa (RIEU, 1975).

De esta manera, *queda constituido un sistema hidrogeológico capaz de almacenar las aguas.*

Condiciones climáticas del Tardi-glacial al Holoceno - Fundamentándose en evidencias palinológicas y paleolimnológicas (MARKGRAF, 1989, MESSERLI, 1993, GROSJEAN, 1994), así como paleoceanográficas (ORTLIEB, 1994), principalmente, han sido efectuados *importantes descubrimientos paleo-ecológicos*. A grandes rasgos, el modelo es el siguiente:

- después del último paroxismo glacial (18 ka BP), durante el cual las temperaturas son muy inferiores a las actuales, el período tardi-glacial (17-10 ka BP) se caracteriza por tener niveles lacustres más altos (entre 5 y 10 metros) en relación con los de hoy día. La modelización de las condiciones climáticas muestra una duplicación (300 a 400 mm, probablemente más) del total anual de las precipitaciones actualmente observadas.

- el Holoceno inferior (10 a 7 ka BP) se distingue por sus temperaturas más altas y sobre todo por tener condiciones mucho más húmedas. Se puede citar "Le début de l'Holocène, 11.000 à 7.000 ans B.P., était caractérisé par des conditions plus humides...(MESSERLI, 1993)".

- las condiciones de hiper-aridez son relativamente recientes: "Environ 3.000 ans avant l'époque actuelle, les conditions sont devenues plus sèches...(MESSERLI, 1993)".

Sin duda alguna, este esquema cuya validez ha sido ampliamente comprobada, muestra que, en una época cercana, *las condiciones pluviométricas fueron propicias para procurar una recarga natural sustancial* que pudo constituir reservas importantes en los estratos permeables identificados en el subcapítulo anterior.

DISCUSION, CONCLUSIONES Y VISION A FUTURO

Los argumentos presentados son antinómicos y pueden dar lugar a interpretaciones opuestas. Al respecto, el grupo UCN-ORSTOM tiene una opinión optimista (POURRUT, COVARRUBIAS, 1994) y considera como más probables tres hipótesis.

1 - mala estimación de las precipitaciones: Una recarga actual sí existiría y, aunque fuese por el momento desconocido su tiempo de tránsito, *el agua vendría en su mayor parte de la infiltración consecutiva a la fundición de las nieves*; se almacenaría en los estratos fracturados superiores, contribuyendo en renovar las reservas geológicas.

2 - existencia de aportes externos: *La cuenca de alimentación de la estribación andina-pacífica podría ser mucho más amplia* que la hoya topográfica definida por las líneas divisorias de agua. Al respecto, estudios isotópicos (GIGGENBACH, 1978) han demostrado que las aguas termales del campo geotérmico de El Tatio se derivan de precipitaciones caídas en el sector oriental. Existen también evidencias de que, en la ladera andina oriental, las condiciones geológicas son muy favorables a la infiltración. Por ejemplo, se ha observado que, después de un corto recorrido, fuertes crecidas procedentes de lluvias de alrededor de 20 mm han sido totalmente infiltradas (François RISACHER, comunicación personal, 1994). Dichas condiciones han sido igualmente comprobadas por el autor en toda la cuenca alta del río Siloli, donde abundan sedimentos clásticos y tobas poco o nada consolidadas que dan nacimiento a manantiales importantes bajo las ignimbritas riolíticas de cobertura. Otro factor positivo conocido es que las cubiertas de nieve son más potentes en el lado este.

3 - descarga de potentes acuíferos: Su interestratificación (punto IV.2) entre capas impermeables del complejo volcánico significa un grado más o menos elevado de aislamiento y bloqueo, en consecuencia, una cierta limitación y regulación de las salidas. Gracias a la acumulación de agua hasta altitudes elevadas, *las reservas se encuentran en carga hidráulica*. Pueden circular en coladas volcánicas a través de la red de fisuras producidas por el enfriamiento rápido de lavas relativamente ácidas (dacitas por ejemplo) o *descargar directamente a los sistemas hidrográficos un flujo, quizás limitado, pero continuo e independiente de las precipitaciones*.

El presente trabajo espera haber contribuido a aclarar algunos conceptos relativos a la existencia de agua en la II Región de Chile. Desde luego, falta todavía mucho antes de conocer toda la cadena que, a partir de la fuente original de vapor de agua, conduce a su redistribución en cada uno de los parámetros que conforman el ciclo hidrológico. Los estudios y tesis en curso, al igual que las investigaciones futuras, intentarán rellenar los principales vacíos en el conocimiento de una realidad compleja, constituyéndose el entendimiento cabal de los mecanismos en un complemento indispensable de la localización de los recursos de agua con miras a su racional aprovechamiento.

En conclusión, a la luz de los resultados mostrados, *¿podría ocurrir un colapso hídrico?* Aunque su opinión sea más optimista, el autor *deja la respuesta a libre interpretación*.

BIBLIOGRAFIA

- Aceitno, P. (1987). *On the interannual variability of South American climate and the Southern Oscillation*, Tesis de doctorado, University of Wisconsin-Madison.
- Baron, A.M., REINHARD J. (1981). *Expedición arqueológica al volcán Licancabur*, Revista de la Corporación para el Desarrollo de la Ciencia, No 1 (4), Santiago
- Boric, R., Díaz, F., Makshev V. (1990). *Geología y yacimientos metalíferos de la Región de Antofagasta*, SERNAGEOMIN CHILE, Boletín No 40.
- Calderón, M.A. (1994). *Relación entre las rocas volcánicas y el flujo y almacenamiento de agua subterránea, sector Vegas de Turi, IIa Región*, memoria de taller de título, convenio UCN-ORSTOM, Facultad de Ingeniería y Ciencias Geológicas de la UCN, abril de 1994.

- Covarrubias, A., Pourrut, P., Köhnenkamp, J. (1994). *Características y problemática hidrológica en los altos Andes septentrionales de Chile*, Congreso Nacional de Aguas Subterráneas, Santiago, noviembre de 1994.
- Fuenzalida, H., Rudtlant, J. *Origen del vapor de agua que precipita en el Altiplano de Chile*.
- Giggenback, W. (1978). *The isotopic composition of waters from El Tatio geothermal field, Northern Chile*, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 42, pp 979-988.
- Grosjean, M., Núñez, L. (1994). *Lateglacial, Early and Middle Holocene environment, Human occupation and Resource use in the Atacama (Northern Chile)*, in *Geoarchaeology: An Internat. Journal*, Vol. 9, No 4, pp 271-286.
- Köhnenkamp, G.J. (1993). *Balance y caracterización de los recursos de agua superficiales de la cuenca del río Salado*, memoria al título de ingeniero civil, convenio UCN-ORSTOM, Antofagasta.
- Markgraf, V. (1989). *Paleoclimates in Central and South America since 18,000 B.P. Based on Pollen and Lake-level records*, *Quaternary Science Reviews* 8, pp 1-24.
- Messerli, B., Grosjean, M., Bonani, G. *et al.* (1993). *Climate change and natural resource dynamics of the Atacama Altiplano during the last 18,000 years: a preliminar synthesis*, in *Mountain Research and Development*, Vol. 13, No 2, pp 117-127.
- Ortlieb, L. (1994). *Evolución de la aridez en el desierto de Atacama durante el cuaternario: nuevas perspectivas*, 7º Congreso Geológico Chileno, Universidad de Concepción, vol. I, pp 351-355.
- Pourrut, P., Covarrubias, A. (1994). *High mountain basins in Northern Chile: water balance problems in volcanic complex*, Conference on Assessment of hydrological temporal variability and changes, Barcelona 27-30 september 1994, pp 129-140.
- Rieu, M. (1975). *Les formations sédimentaires de la Pampa del Tamarugal et le Río Loa (Norte Grande du Chili)*, *Cahiers ORSTOM, sér. Géol.*, vol. VII, No 2, pp 145-164.