

**SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERIA HIDRAULICA
XI CONGRESO CHILENO**

**ESTUDIO DEL ORIGEN Y PROCESOS DE SALINIZACION DE LAS AGUAS
SUBTERRANEAS DEL VALLE DE AZAPA**

**HUMBERTO PEÑA TORREALBA (1)
CARLOS SALAZAR MENDEZ (2)**

RESUMEN

El Valle de Azapa (I Región) históricamente ha presentado una situación crítica en relación al déficit de recursos hídricos, la cual se intentó paliar con trasvases desde la cuenca del río Lauca. Esta situación se ha agudizando en los últimos años, producto del crecimiento urbano de la ciudad de Arica y del fuerte desarrollo agrícola. El uso de recursos hídricos ha sido cada vez más intensivo, situación que ha planteado sobre el acuífero una demanda creciente, detectándose problemas de deterioro de la calidad de las aguas, atribuible principalmente a procesos de salinización.

El presente trabajo tiene como propósito mostrar los resultados obtenidos, utilizando tanto técnicas de hidrología isotópica como métodos convencionales. Los objetivos específicos son el estudio del origen, movimiento y procesos de salinización en el valle y, evaluar el impacto de las aguas trasvasadas y posibles problemas de intrusión salina en el sector costero.

(1) Ing. Jefe Dpto. Estudios y Planificación.

Dirección General de Aguas. M.O.P

(2) Ing. Jefe Dpto. Conservación y Protección Rec. Hídricos.

Dirección General de Aguas. M.O.P

I INTRODUCCION

Uno de los principales factores que limita el desarrollo del Norte Grande de Chile es su extremada aridez. Es el caso de la ciudad de Arica la cual presenta una situación extremadamente crítica debiendo mantener permanentemente un sistema de racionamiento de los consumos.

Para cubrir el déficit de recursos hídricos, en 1962 fue puesto en operación un canal para el trasvase de agua al río San José desde el río Lauca (700-800 l/s). Sin embargo, la situación de déficit se ha agravado como resultado del crecimiento de la ciudad de Arica, detectándose además problemas de salinización de las aguas, lo que resulta especialmente grave considerando las limitaciones ya señaladas.

El presente trabajo tiene como propósito general entregar una visión general orientada a mejorar la gestión del acuífero. Cabe destacar que se han empleado técnicas de hidrología isotópica, cuyos conceptos básicos fueron presentados anteriormente (Peña, 1987), considerando que es posible suponer que las aguas altiplánicas tendrán una composición isotópica diferente de las aguas propias del valle.

Los objetivos específicos del estudio son: a) analizar el origen, movimiento y procesos de salinización de las aguas subterráneas en el Valle de Azapa; b) analizar el impacto de las aguas provenientes del río Lauca (vía canal de trasvase) en las aguas subterráneas originales del acuífero en explotación; c) Investigar la posible contaminación de las aguas del acuífero producto de la intrusión marina, en la zona terminal de la cuenca.

II DESCRIPCION DE LA ZONA

1. Geología e Hidrogeología

El curso inferior del Valle de Azapa, comprendido entre la bocatoma del canal Azapa y la desembocadura del río San José se

ha desarrollado cortando principalmente las formaciones de Oxaya y Azapa, atravesando rocas de tipo intrusivo en el sector de Cabuza, rocas estratificadas volcánicas, sedimentarias Jurásicas y Cretácicas correspondientes a las formaciones Camaraca, Los Tarros y Ajataña, que presentan nulas a escasas perspectivas desde el punto de vista de su calidad como acuíferos. Los rellenos cuaternarios constituyen las principales fuentes de aguas subterráneas, los depósitos fluviales actuales y aterrazados constituyen las principales vías de circulación y recarga de aguas subterráneas.

En términos generales puede señalarse que los acuíferos principales de la cuenca tienden a ubicarse a profundidades variables entre 0 y 70 m., dando lugar a la existencia de napas libres, algunas de las cuales, estarían en condiciones de semi-confinamiento.

A pesar de la continuidad longitudinal del relleno en la cuenca, algunos estudios la separan en tres sectores atendiendo a la presencia de irregularidades que provocan discontinuidad en el flujo subterráneo, debido a disminuciones locales de la transmisibilidad que se traducen en descensos en la cota del nivel freático. Las secciones definidas son Cabuza- Albarracines; Albarracines-Alto Ramírez; Alto Ramírez-Desembocadura.

2. Clima

Entre la costa y la cota 1.000 m.s.n.m aproximadamente, se tiene un clima desértico y prácticamente no llueve. Entre la cota 1.000 y 2.000 m.s.n.m.. se presenta un clima desértico normal con gran limpidez de atmósfera y baja humedad relativa. La pluviometría es escasa con lluvias ocasionales en la parte superior que son intensas y de corta duración. Entre la cota 2.000 y la 3.500 m.s.n.m., se produce una importante variación en la magnitud y distribución de las lluvias, provocada por la influencia de las masas de aire de origen ecuatorial continental que originan el llamado invierno boliviano. Las lluvias anuales, con valores del orden de los 200 mm en la parte alta, ocurren

normalmente en el período diciembre a marzo.

Sobre los 3.500 m.s.n.m. ocurren precipitaciones en forma regular y de mayor magnitud siempre provocadas por el invierno boliviano. Sobre los 4.500 m.s.n.m. la precipitación es de tipo nival, con valores anuales del orden de los 500 mm.

3. Hidrología

a) Aguas Superficiales

La cuenca del río San José abarca una superficie de aproximadamente 3.200 Km², quedando delimitada por el Norte por los cordones que la separan de la cuenca del río Lluta, por el Sur por la cuenca del río Codpa, y por el Oriente por la cuenca del río Lauca. (Fig. 1). La red de drenaje está constituida en el sector de cabecera, por los ríos Tignamar y Seco, que dan origen al río San José, cubriendo una superficie de 870 Km².

El régimen hidrológico del río San José se considera permanente hasta el sector de Humagata, llegando ocasionalmente hasta la altura de Livilcar; respaldado por las precipitaciones de origen altiplánico que se generan en la parte alta de la cuenca. Al régimen natural se superpone desde el año 1962 el agua aportada por el canal Lauca cuyo caudal medio (1960-1980) alcanza a cerca de 800 l/s y que es captado por el canal Azapa. El caudal medio anual en el sector de la captación varía entre 250 y 2.200 l/s con un promedio del orden de 950 l/s; a nivel mensual promedio los caudales oscilan entre 640 y 2.000 l/s.

b) Aguas Subterráneas

La forma angosta y alargada del Valle del río San José impone un sentido de escurrimiento longitudinal en prácticamente toda la cuenca, excepto en las cercanías de la costa.

Se estima que ingresa al sistema, a la altura de B.T. Canal Azapa, un gasto del orden de 300 l/s y de 600 l/s en el sector de Cabuza. La descarga del sistema subterráneo se produce

tanto en forma natural como artificial. La descarga natural está dada por los caudales de afloramiento de 15 vertientes entre el sector de Cabuza y el mar, los cuales se concentran en dos áreas específicas, Las Riveras-Albarracines y Las Animas. La magnitud de dichos afloramientos varía considerablemente, en Albarracines fluctúa entre 70 y 400 l/s, y en las Animas entre 0 y 150 l/s; la descarga artificial se efectúa a través de sondajes y norias, ubicados principalmente en el valle, y que extraen del orden de 600 l/s.

La descarga neta al mar es muy pequeña (150 l/s), debido a los bajos gradientes en el sector costero; y a los niveles dinámicos que establecen las explotaciones en el sector. Esto último genera inversiones que podrían provocar un problema de intrusión salina.

Del análisis de la variación de niveles se estima que para el sector entre Cabuza y Saucache aumentos anuales de 1 a 4 m producen recargas entre 3 y 10 millones de m³; por otra parte los períodos de desembalse los volúmenes alcanzan entre 3 y 6 millones de m³. Por su parte en la zona baja de la cuenca, se estiman volúmenes de recuperación que alcanzan a unos 4 millones de m³ al año; las tendencias de disminución de niveles entregan volúmenes del orden del 17 millones de m³ anuales. Cabe señalar que se detecta una ostensible variación en los niveles, con ciclos marcadamente descendentes y significativas recuperaciones, asociadas principalmente a la recarga generada por crecidas.

En general la determinación de los volúmenes de almacenamiento del sistema acuífero presenta cierta incerteza, a partir de los resultados obtenidos (DGA, 1989). Para el sector de Cabuza-Albarracines se estima un volumen almacenado en torno a 260 millones de m³; de acuerdo con ésto se estima en forma preliminar que el volumen almacenado total alcanza a alrededor de 500 millones de m³. Si se estima que los caudales totales de recarga al acuífero son del orden de 1 m³/s, ello significaría un tiempo medio de residencia de aproximadamente 16 años.

fueron realizados en el Laboratorio de la D.G.A. Los análisis de isótopos O-18, H-2, H-3, C-14 y S-34 fueron realizados en Laboratorio de Isótopos Ambientales de la CCHEN y en el Instituto de Hidrología del GSF de Alemania.

Las campañas contemplaron mediciones de las aguas superficiales en la zona de cabecera y en el valle, así como en la cuenca del río Lauca, (28 muestras) y aguas subterráneas (vertientes y pozos) en el valle y la zona costera (92 muestras).

IV. ANALISIS DE RESULTADOS

1. Caracterización isotópica

a) Aguas Superficiales

El estudio isotópico de las aguas superficiales estuvo básicamente orientado a caracterizar la calidad en las entradas al sistema acuífero del valle de Azapa, distinguiendo entre a) caudal base propio de la cuenca; b) caudal de trasvase de origen altiplánico y c) caudal de crecidas del río San José.

A partir de los antecedentes obtenidos se efectúan los siguientes comentarios:

Las aguas propias de la cuenca, (vertientes de Tignamar, Chusmiza, río Seco, Belén, Lupica y Saxamar) que caracterizan el flujo base, presentan contenidos isotópicos con valores de -66 en H2 y -7,5 en O18. Es importante destacar que el rasgo que mejor identifica estas aguas es su ubicación en el entorno de la recta meteórica mundial. Además, si se considera que los estudios anteriores efectuados en la región altiplánica muestran que las precipitaciones se alinean en la misma recta, se concluye que los procesos evaporativos no juegan un papel importante en el proceso de recarga de estas vertientes (fig. 2).

Las aguas altiplánicas muestreadas en las nacientes del río Lauca, a lo largo del canal de trasvase y en el canal Azapa tienen un contenido isotópico que varía en un rango muy amplio, pero que sin embargo presentan un notable alineamiento según una

recta de evaporación de pendiente $m = 4.5$. La prolongación de dicha recta además pasa muy próxima al contenido isotópico del Lago Chungará, que se encuentra fuertemente evaporado (fig. 2).

Este comportamiento peculiar tiene su explicación en la elevada evaporación que se observa en las lagunas de Cotacotani, las cuales dan origen al río Lauca, y en su mezcla con otros aportes en su recorrido. De este modo, en períodos de sequía el contenido isotópico de las aguas de trasvase se observa muy evaporado, mientras que en períodos más húmedos o en crecidas esa característica tiende a disminuir o desaparecer.

Al comparar precipitación y caudal se pudo observar que los contenidos isotópicos más livianos, ubicados sobre la recta meteórica, coincidían con períodos que siguen a lluvias importantes; cabe señalar que dicho contenido isotópico es perfectamente coherente con el determinado en otras zonas altiplánicas ubicadas inmediatamente al sur (Peña, 1987).

De acuerdo a este análisis las aguas de trasvase se caracterizan principalmente por su ubicación durante los períodos normales bajo la recta meteórica, con contenidos típicos de $\delta D = -78$ y de $\delta^{18}O = -9,2$ (fig. 2).

No fue posible obtener muestras de crecida del río San José, sin embargo, las investigaciones realizadas en otras cuencas de la región permiten suponer que ellas presentan un comportamiento similar al de las vertientes de la cuenca alta del río (o algo más pesadas).

En síntesis se puede señalar que el elemento más característico de las aguas de trasvase, en relación a las aguas propias de la cuenca y las de crecida, es su ubicación por debajo de la recta meteórica; con un exceso de deuterio claramente inferior a 10, valor que define a las aguas de otro origen (fig. 3 y 4)

b) Vertientes y Aguas Subterráneas

Las vertientes y aguas subterráneas se ubican entre los contenidos isotópicos característicos de las aguas propias y de

las importadas a la cuenca, correspondiendo posiblemente a una mezcla de ambos tipos de agua. Sin embargo, algunas muestras se ubican sobre la recta meteórica con valores enriquecidos en isótopos pesados, situación que puede corresponder a recarga de aguas de crecida o de aguas propias (fig. 4).

Se desprende además que los procesos evaporativos, caracterizados por el fraccionamiento isotópico, no han estado presente en forma decisiva en el proceso actual de recarga; aunque pudieran estar presentes en una segunda instancia, a través de la evaporación de aguas previamente mezcladas.

Las aguas de las vertientes tienden a ser levemente más livianas y con un mayor exceso de deuterio que las aguas subterráneas, lo que las asemeja más a las aguas de trasvase (fig. 4 y 5).

Las aguas subterráneas tienden a ser comparativamente más ricas en isótopos pesados y a presentar un mayor exceso de deuterio a medida que se aproximan al océano. Esta distribución espacial sugiere que las aguas del sector alto corresponden a una mezcla entre las aguas propias de la cuenca y las aguas del trasvase, con una fuerte componente de esta última. En el tramo inferior los aportes del trasvase, más livianos y con un menor valor del d^* , serían menos significativos (fig. 5).

No es posible atribuir esta distribución a procesos evaporativos, los cuales tendrían que ir asociados a un menor valor del exceso de deuterio hacia aguas abajo.

De acuerdo con lo anterior, en el Valle se estaría produciendo una mezcla de las aguas importadas a la cuenca, la cual estaría en una fase más avanzada en el tramo superior, como resulta lógico de esperar.

No obstante esta tendencia general, se presenta cierta dispersión de los resultados, obteniéndose contenidos isotópicos diferentes en puntos de medición relativamente próximos. Esto se explica por la complejidad de los mecanismos de recarga, con la existencia de áreas de recarga local debido a la percolación de agua de riego o de crecidas.

El contenido isotópico de las vertientes resulta concor-

dante con el contenido de las aguas subterráneas de su entorno.

Tanto la información de ^3H como de ^{14}C indican fehacientemente que las aguas subterráneas del Valle, con valores de ^3H del orden de los 2 UT y de ^{14}C similar al 100% de pmc, tienen una alta proporción de aguas recargadas en los últimos 30 años, fecha posterior al inicio del trasvase desde el altiplano. Esta conclusión resulta, muy coherente con la interpretación del contenido isotópico de las aguas del Valle, como producto de una mezcla entre aguas propias de la cuenca e importadas (fig. 4).

Se pudo comprobar además una disminución del contenido de ^{13}C hacia aguas abajo, fenómeno muy similar al investigado en otros ríos de la zona que ha sido atribuido al aporte de carbono biogénico presente en la zona de las raíces, que se incorpora al flujo como resultado de aprovechamiento de los recursos hídricos para fines de riego.

Lo anterior confirma la idea de un proceso de mezcla que se desarrolla con mayor fuerza en el sector alto del Valle y que se propaga paulatinamente hacia aguas abajo.

2. Hidroquímica

a) Evolución histórica de la Constitución Química.

Los antecedentes de calidad química muestran extraordinario incremento de la salinización de las aguas de la cuenca. En efecto, la conductividad eléctrica que a principios de los años 60 alcanzaba en las vertientes a valores de 600-1000 mmhos/cm y en las aguas subterráneas a 1000 - 1200 mmhos/cm, en la actualidad entrega cifras del orden de los 2000 - 2500 mmhos/cm, es decir se han duplicado e incluso triplicado las concentraciones originales (fig.6).

Este proceso de salinización ha estado acompañado de un desplazamiento de las características químicas de las aguas, observándose un importante incremento relativo de los cloruros y de los cationes $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ (Fig.8 y9). Cabe señalar que aún cuando los sulfatos no han mostrado un incremento notorio, se

encuentran excedidos levemente en el límite de las normas de calidad de agua para fines domésticos.

b) Caracterización Hidroquímica de la Situación Actual.

Las aguas superficiales propias de la cuenca y las importadas tienen valores de conductividad entre 600 y 800 mmhos/cm, substancialmente inferiores a las medidas actualmente en aguas subterráneas y vertientes del Valle.

Estos valores, sin embargo, son coincidentes con los que se registraban en esas aguas antes de la entrada en funcionamiento del trasvase. Se comprueba además que la conductividad de las vertientes y de las aguas subterráneas varía en un amplio rango a lo largo del Valle, sin que se reconozca una tendencia clara en función de la cercanía al océano. Sólo es posible identificar un aumento consistente de la salinidad en algunos pozos próximos a la playa.

Otro aspecto que conviene destacar es la coincidencia en el de la constitución química de las aguas superficiales actuales con la observada en las aguas subterráneas y vertientes antes del trasvase (fig. 7 - 8 y 9)

En síntesis, la calidad de las aguas superficiales es concordante con la situación anterior de las aguas subterráneas en el Valle y difiere significativamente con la actual.

3. Comparación entre la distribución del contenido isotópico y la salinidad.

A través del contenido isotópico se ha intentado determinar si el incremento de salinidad se asocia de forma preferente a una de las fuentes de recarga. Al respecto se señala lo siguiente:

La intensidad de la salinización de las aguas resulta independiente de su contenido isotópico.

No fué posible detectar modificaciones en el exceso de deuterio con el contenido de sales. Esta situación se explica

debido a que dicha variable, no se relaciona con procesos evaporativos desarrollados en el Valle, los que podrían significar una mayor concentración de sales.

Las razones iónicas no presentan fluctuaciones atribuibles al contenido de isótopos.

El incremento local de salinidad en algunos pozos próximos a la playa no se relaciona con cambios en la composición isotópica.

Lo anterior hace pensar que el origen de la salinización del Valle se encuentra fuertemente influido por situaciones locales tales como prácticas agrícolas, composición química de suelos, procesos de lavado de terrenos agrícolas, reuso de agua y otros, y no por la procedencia del recurso hídrico.

V CONCLUSIONES GENERALES

- Se ha podido comprobar el desarrollo de un proceso de mezcla de aguas de diversos orígenes a lo largo del acuífero Valle, que se manifiesta con mayor intensidad en los sectores más altos y débilmente hacia la desembocadura. Este comportamiento se ve favorecido por la gran dinámica del acuífero y la velocidad de renovación de sus aguas.
- La investigación histórica de los registros de calidad de agua han confirmado un significativo deterioro de las aguas del valle en los últimos 30 años; sin embargo, no se ha detectado una relación directa entre las aguas altiplánicas importadas a la cuenca y el incremento de sales.
- Se estima que el proceso de salinización se relaciona a la expansión del área agrícola la cual pasó de 800 a 3.200 has. en los últimos 30 años, la cual va unida al lavado de suelos salinos en áreas de nuevo riego, y a un uso más intensivo de los recursos hídricos.
- Para alcanzar un conocimiento más profundo de las causas precisas del aumento de sales, se considera imprescindible desarrollar un programa de investigaciones más detallado en

algunas áreas seleccionadas que permitan definir claramente las situaciones locales, y además complementar los estudios con antecedentes de sectores o fenómenos de los cuales no ha sido posible obtener información.

- *Desde el punto de vista de la gestión de cuencas, es importante poner énfasis en la naturaleza y magnitud de los impactos asociados a proyectos de riego en zonas áridas.*

VI. REFERENCIAS

- D.G.A. (1989) *Modelo de simulación de las aguas subterráneas del valle de Azapa. Realizado por Ayala, Cabrera y Asoc. Ltda.*
- D.G.A. (1993) *The Study on the development of water resources in northern Chile. Interim Report (1). JICA-P.C.I.*
- PEÑA, H. et al (1987) *Utilización de técnicas isotópicas en hidrología de zonas áridas. Aplicación en la provincia de Iquique. I Región. VIII Congreso Nacional de Ingeniería Hidráulica.*
- PEÑA, H. et al. (1991) *Estudio del origen y proceso de salinización de las aguas del río San José. I Región. Doc. Síntesis 1/92. D.G.A.-M.O.P.*

FIG. 3

DEUTERIO vs d^*
AGUAS SUBTERRANEAS Y VERTIENTES

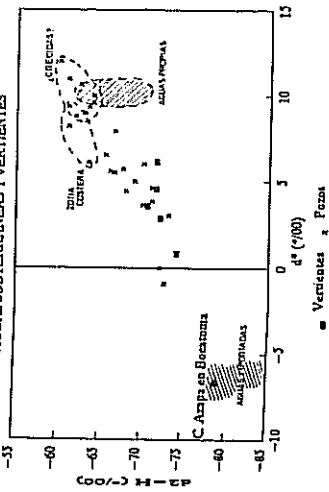


FIG. 4

DEUTERIO vs OXIGENO-18
AGUAS SUBTERRANEAS Y VERTIENTES

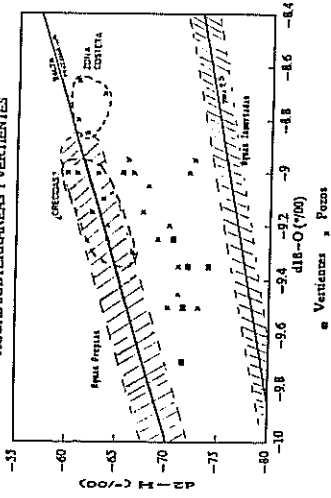


FIG. 5

d^* vs DISTANCIA
AGUAS SUBTERRANEAS Y VERTIENTES

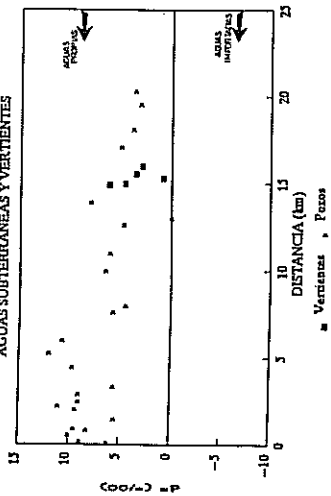
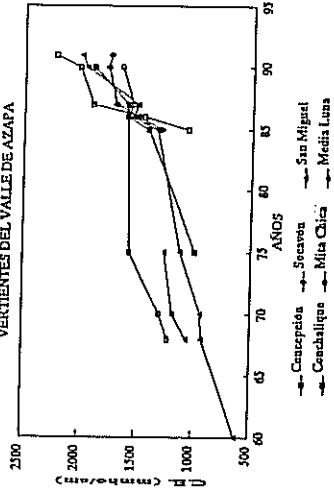


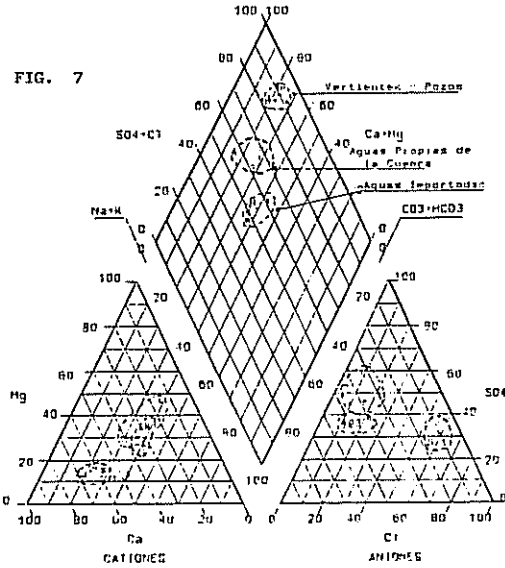
FIG. 6

CONDUCTIVIDAD vs TIEMPO
VERTIENTES DEL VALLE DE AZAPA



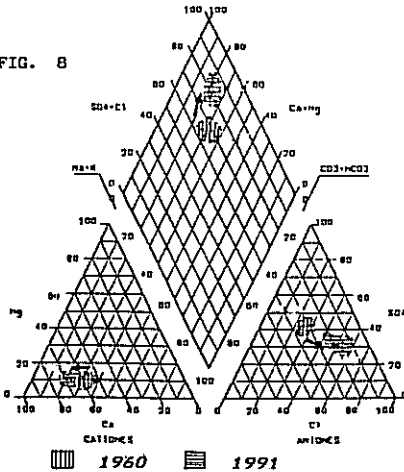
AG. SUPERFICIALES - VERTIENTES - POZOS

FIG. 7



AG. SUBTERRANEAS 1960 - 1991

FIG. 8



VERTIENTES 1960 - 1991

FIG. 9

