



LA HIDROGEOQUIMICA EN EL CONOCIMIENTO Y MANEJO  
DE HOYAS Y SU APLICACION AL NORTE DE CHILE.

---

Hugo Alonso Carballo\*  
Sonia Orellana González

RESUMEN

Definiendo el concepto de hidrogeoquímica, se lo aplica críticamente a la información disponible sobre química de aguas en el Norte de Chile. Con objeto de desarrollar esta disciplina en su aplicación al conocimiento y manejo de hoyas hidrográficas en esa región, se ha programado un estudio prototipo en la cuenca del río Loa utilizando el contenido de algunos elementos en trazas como indicadores. Se avanza algunos resultados donde se aprecia que la concentración de F, Li, Cu, Rb, Sr y V aumenta con la salinidad del río.

ABSTRACT

The concept of hydrogeochemistry is critically applied to the information available on water chemistry in Northern Chile.

For the purpose of developing this field of study as regards its application to the knowledge and handling of hydrographic basin in that region, a prototype survey has been planned in the Loa River Basin, utilizing the content of some trace elements as indicators. Some results have been gotten where it can be noticed that the concentration of F, Li, Cu, Rb, Sr and V increases with the river salinity.

---

(\* ) Depto. de Geociencias,  
Universidad del Norte.

## 1.- CONCEPTO DE HIDROGEOQUIMICA

Sin pretender una definición rígida, puede aceptarse que la Hidrogeoquímica es una especialidad de la Geoquímica que estudia el comportamiento de los elementos químicos y sus compuestos en la hidrósfera, así como los procesos geológicos y leyes físico-químicas que lo rigen. Se preocupa de los fenómenos de transferencia de elementos entre litósfera, atmósfera, biósfera e hidrósfera y su movilidad en esta última, siendo el sol la fuente principal de la energía requerida en estos cambios.

La hidrósfera es considerada una solución natural regida por las leyes de la físico-química de soluciones. Su composición es resultante de la alta reactividad química de la interfase atmósfera-superficie terrestre, producto de la tendencia al equilibrio del sistema roca-agua-aire. Desde el punto de vista de su aprovechamiento la composición química del agua, junto a caracteres físicos y biológicos, origina el concepto de calidad que se refiere a su capacidad de uso, especialmente urbano, agrícola e industrial.

## 2.- ALGUNOS ANTECEDENTES SOBRE QUIMICA DE AGUAS EN EL NORTE DE CHILE.

La composición química de las aguas del Norte de Chile está influida por dos condicionamientos principales: ambiente salino, que explica los elementos mayores y volcanismo, al que se relaciona la presencia de varios de sus elementos en trazas.

El alto contenido en sales, tanto del suelo como en grandes depósitos, es fuente principal de cationes alcalinos y alcalino-terreos y aniones dominantes como cloruros y sulfatos. La movilidad de estas sustancias está regida mayormente por equilibrios de disolución-precipitación. Una importante característica de las aguas salinas ricas en cloruros, es su mayor capacidad lixiviante comparada

con el agua pura respecto a los metales corrientes, ya que éstos ven favorecida su movilidad al ser transportados como complejos, en particular clorurados. (Helgeson, H., 1964; Barnes, H. y Csamanske, G., 1967; Holland, H., 1972). Los estudios en inclusiones fluidas han dado evidencias acerca de la salinidad de los fluidos hidrotermales ligados a mineralización. (Sawkins, F., 1964; Roedder, E., 1967; Nash, T., 1976).

El volcanismo es un activo movilizador de materiales lo que es acusado en aguas ligadas a él directa o indirectamente (White, D., 1958). La presencia de compuestos metálicos en emanaciones volcánicas abre un campo de discusión sobre la movilización de metales - (Krauskopf, K., 1967). De interés en este aspecto es el uso de indicadores químicos en la detección y estudio de actividades volcánicas y sísmicas (Markhinin, E. y Boshkova, L., 1975; Menyailov, I., 1975; Gigenbach, W. y Glover, R., 1975; Glover, R., 1975; Iwasaki, I., 1975). Es pues comprensible que las aguas del Norte de Chile, relacionadas con el volcanismo cuaternario de Los Andes, lleven elementos químicos diversos, muchos de los cuales están en concentraciones tales que limitan su capacidad de uso, en especial potable (Henríquez, H., 1978). El caso del arsénico en el agua potable de la II Región es conocido a nivel internacional.

### 3.- INFORMACION DISPONIBLE

Una gran parte de la información disponible sobre análisis químico de aguas superficiales y subterráneas del Norte de Chile, se encuentra en publicaciones e informes internos de distintas instituciones. Es frecuente su carácter restringido y confidencial y a menudo sólo complementa al tema central, principalmente geológico o ingenieril. Una de las mejores fuentes de información está en la Biblioteca del ex Instituto de Investigaciones Geológicas hoy Servicio Nacional de Minería y Geología. Sin la intención de agotar la bibliografía pueden recomendarse dos obras de recopilación donde se encuentra información de trabajos publicados a nivel de geociencias: Klohn,

W., 1972; Henríquez, H. y Falcon, E., 1975.

Respecto a composición de aguas geotérmicas se dispone de publicaciones sobre El Tatio (Ellis, A., 1969; Giggenbach, W., 1978). Un estudio hidrogeoquímico de interés fue hecho en fuentes termales de Chile Central por Ann de Grys (1965).

#### 4.- LIMITACIONES DE LA INFORMACION

Una revisión de muchos de esos trabajos con el criterio hidrogeoquímico expuesto, conduce a las siguientes observaciones generales:

- a) Información química frecuentemente incompleta en relación a la necesaria para caracterizar un agua. Es corriente encontrar datos sólo de cloruros, sólidos totales, o dureza. En otros casos al realizar balances químicos de comprobación se obtienen desviaciones químicas inaceptables que restan confiabilidad a esa información.
- b) Distintas unidades para expresar los análisis químicos. Algunos informes utilizan partes por millón (ppm), otros, miliequivalentes por litro (me/L) y otros porcentajes. De ahí que para comparar valores se requiere hacer conversiones para algunas de las cuales se necesitan ciertos datos químicos, dificultándose así la interpretación de informes que utilizan unidades distintas a las habituales del usuario.
- c) Carencia de información de terreno tanto químicas (pH, temperatura, conductividad eléctrica) como hidrológicas (caudales) para relacionarlas con resultados de laboratorio.
- d) La información no es trabajada en el sentido de su presentación en diagramas de clasificación habituales, discusión de razones entre iones o tratamiento estadístico adecuado. De un listado monótono de datos es difícil obtener una visión -

sobre tendencias, valores background y anómalos, correlación entre iones y otros antecedentes que permitan inferir la calidad y potencialidad de uso de esas aguas.

- e) Excepto de los elementos mayores (Ca, Mg, Na, K) muy poca o ninguna información se tiene sobre elementos menores o en trazas, salvo del B (por su incidencia en riego), As (potabilidad), I y Li (interés industrial). Datos sobre F, Sr, Rb y Fe son esporádicos. No se ha encontrado información sobre elementos como Cd, Cr, Co, Cu, Pb, Mn, Hg, Ni, Mo, V, Se, F, Ag, Zn, Sn cuya determinación en el Norte de Chile sería de interés incluso económico (prospección hidrogeoquímica de yacimientos).
- f) En forma destacada debe hacerse notar que gran parte de los trabajos revisados proporcionan información química sólo puntual, es decir, válida para una fecha determinada. La falta de continuidad en las determinaciones no permite evaluar posibles variaciones estacionales producidas por agentes naturales o humanos, de gran interés para una discusión hidrogeoquímica efectiva.

## 5.- ANALISIS DE SEDIMENTOS DE FONDO

En la revisión de trabajos a la que se alude anteriormente, no se ha encontrado información sobre contenido de elementos, en especial de trazas, en sedimentos del fondo de corrientes superficiales. La necesidad de estos análisis surge del hecho que los sedimentos, por estar expuestos a distintas condiciones de escurrimiento y composición de agua, actúan como integradores. El análisis de sedimentos en condiciones de flujo bajo permite interpretar la concentración de elementos como producto de un período dado de tiempo, es decir, en cierto modo, como un valor de base (background). Desde el punto de vista de manejo de aguas, permitiría alertar sobre posibles acumulaciones de elementos potencialmente nocivos. Para la Hidrogeo

química aplicada a prospección, se favorece la delimitación de áreas con anomalías en el contenido de elementos.

## UN PROTOTIPO PARA ESTUDIOS HIDROGEOQUIMICOS EN EL RIO LOA.

A diferencia de los análisis químicos sobre material sólido, los valores obtenidos en aguas continentales, por las contingencias propias al ciclo hidrológico (meteorológicas, geológicas y humanas), indican sólo la composición para un momento dado de su flujo. Por tanto, para cada lugar de observación se requiere de un cierto número de valores proyectados en el tiempo para obtener información representativa. Así, para definir químicamente un sistema es necesario diseñar una red de mediciones que permita evaluar sus posibles variaciones espaciales y temporales, en relación a cambios naturales o de acción humana. El diseño de una red es producto del compromiso entre dos factores: Conveniencia de contar con la mayor información posible e imperativo económico que limita los puntos espaciales y temporales de muestreo y los tipos de análisis a realizar.

En el caso del Norte de Chile, la optimización del uso del escaso recurso agua entre las demandas urbana, minera y agrícola ha obligado a realizar diversos estudios hidrológicos y de manejo en los - cuales la información hidrogeoquímica no ha sido siempre la más indicada. Con objeto de determinar las variables más adecuadas en el diseño de una red de mediciones, se planteó un estudio piloto en el río Loa, II Región, tomando como referencia algunos trabajos del B.R.G.M. en Francia (Landrau, A. y Lemolne, B., 1977) y del U.S. Geological Survey en U.S.A. (Rickert, O. et al, 1976; Feder, G., 1979; Wentz, D. y Doak Steele, T., 1980).

Se optó por el río Loa por ser el más importante del - Norte de Chile; por tener de él información de diversos trabajos sobre calidad (Niemeyer, H., 1967; Peña, O., 1979; Alonso, H., 1979) y de informes técnicos diversos (Espíldora, B. et al, 1979), así como una informa

ción de mediciones hechas por distintos servicios (Dirección de Riego y Dirección General de Aguas, M.O.P. II Región). Además, las aguas de su sistema tienen uso urbano, en riego y en minería, sectores que presentan demandas difíciles de satisfacer a futuro, exigiendo estudios de manejo en los que la información hidrogeoquímica será muy necesaria.

Los principales aspectos a estudiar son los siguientes:

- A) Optimizar un programa de muestreo en el sentido de obtener información suficiente con el menor número posible de lugares y frecuencias de muestreo.
- B) Agregar a los elementos químicos habituales (Ca, Mg, Na, K, B, As), la determinación de algunos elementos en trazas elegidos por la fiabilidad (a evaluar en cada caso) de sus técnicas de análisis; su probable ocurrencia en aguas considerando la geología de la región; y su posible presencia como contaminante para uso potable (normas chilenas de calidad). En un primer subprograma se realizaron determinaciones para Cu, Fe, Zn, Rb, Sr, V, F y Li, presentándose en este trabajo algunos de resultados.

Se considera incluir otros elementos así como descartar algunos de los anteriores cuyos contenidos ofrezcan dudas de fiabilidad o de utilidad para los fines buscados.

- C) Posibles fuentes de metales en relación a la geología regional, particularmente a los yacimientos (evaluación del método, de prospección hidrogeoquímica).
- D) Criterios de clasificación y presentación de la información para confeccionar una carta de calidad química de aguas y su aptitud de uso.

Se han elegido los siguientes lugares de muestreo en el río Loa (Fig. 1): (1) alcantarilla Conchi; (2) salida tranque Conchi; (3)

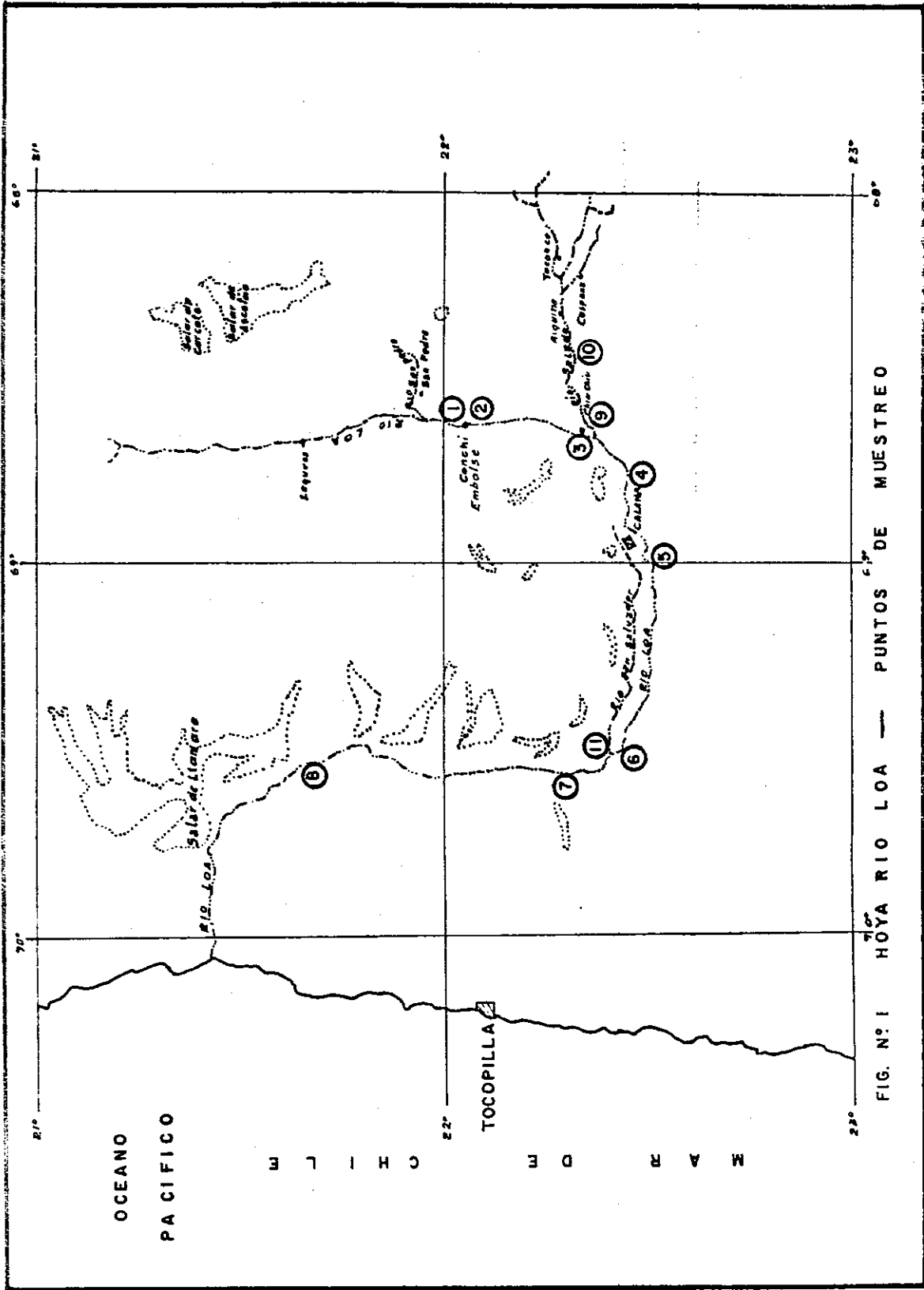


FIG. N° I HOYA RIO LOA — PUNTOS DE MUESTREO



antes río Salado; (4) Yalquincha; (5) la Finca; (6) antes río S.Salvador; (7) Puente La Posada; (8) Quillagua. Los afluentes considerados son: (9) río Salado antes Loa; (10) Salado sifón Ayquina; (11) río S.Salvador antes Loa. En esos mismos puntos se hará análisis de sedimentos y en algunos de ellos, de vegetación.

## TECNICAS DE MUESTREO Y DE ANALISIS

Las muestras se colectan en botellas de polietileno, doble tapa, 1 litro, lavadas y tratadas 48 horas con  $\text{HNO}_3$  1:4. Tanto en el transporte como manipulación se adoptan precauciones especiales para evitar contaminación. En cada punto se toman dos muestras: acidulando una de ellas con 4 ml de HCl conc. de alta pureza o bidestilado para el análisis de trazas y la otra, sin acidular, para el resto de las determinaciones. Se descartó la acidulación con  $\text{HNO}_3$ , recomendada en algunas técnicas, por su interferencia en análisis de As y V.

En el mismo lugar de muestreo se mide pH y temperatura, no habiéndose podido determinar confiablemente el Eh hasta el momento.

Para el análisis de metales se utiliza absorción atómica (Perkin Elmer mod. 603) excepto para el V, determinado por el método de oxidación catalítica del ácido gálico y As, por dietilditio-carbamato de plata. En absorción atómica se ha comparado el método de lectura directa desde la muestra y el que utiliza previamente quelación y extracción con metil isobutil cetona.

## RESULTADO PRELIMINAR: ELEMENTOS EN TRAZAS EN EL RIO LOA

Se dispone de los resultados de una primera corrida de muestreo efectuada en Noviembre de 1981. Para Abril de 1982 se considera otra salida para determinar la posible influencia de nuevas condiciones meteorológicas, particularmente secas respecto al mismo

período de un año normal.

Con objeto de determinar las tendencias principales en el contenido de elementos en trazas en relación al progresivo aumento de salinidad del río Loa, se han considerado en los gráficos que se presentan, sólo los puntos más característicos del río Loa mismo.

## RANGOS COMPARATIVOS

Para fijar un primer esquema referencial, se ha comparado los rangos de concentración de elementos en trazas en el río Loa con rangos de valores en algunas aguas termominerales de Chile (Ellis, J., 1969; de Grys, A., 1965) y con rangos de contenido mundial en aguas de ríos (Holland, H., 1978). Ver Tabla N°1.

Tanto por su contenido en elementos mayores como en el de trazas, el río Loa está más cerca del grupo de aguas mineralizadas, de alta salinidad y relacionadas con volcanismo. Esta caracterización química global lo aleja de la propia de un río medio y, por lo tanto, también de la capacidad de uso cualitativa de éstos últimos, planteando así diferente problemática de su manejo.

## TENDENCIAS DE VARIACION

Sin considerar el Fe por tener algunos valores bajo el límite de detección y el Zn por presentar contenido y variaciones poco significativas, se aprecia para Cu, Li, Rb, Sr y F una tendencia a aumentar su concentración a lo largo del curso del río, coincidiendo con el aumento en el contenido de elementos mayores propio al incremento de la salinidad. En la Fig. N°2 se visualizan estas tendencias comparándolas con el contenido de cloruros, importante indicador de salinidad.

Respecto a algunas razones de interés, en la Fig. N°3 se observa la tendencia de evolución para las razones Cl/F, Na/Li, Ca/Sr y Rb/Sr. Excepto para Ca/Sr las demás razones presentan tendencias a

T A B L A N°1

RANGO DE CONCENTRACION DE ELEMENTOS EN EL RIO LOA COMPARANDO  
CON AGUAS TERMOMINERALES EN CHILE Y RIOS MUNDIALES (ppm).

Elemento	Rfos mundiales (C)	Río Loa	El Tatio (a)	Chile Central (b)
Ca	3.9 - 31.1	112.4-427.60	24 - 280	4.0 - 2240
Mg	1.5 - 5.6	63.3-231.30	0.2- 4.5	0.4 - 96
Na	2.9 - 11	237.7-1770.30	12 -4600	17 - 15000
K	1.4 - 2.3	17.3- 114.80	3 - 530	1.9 - 1780
Li	0.0 - 0,037	1.35- 13.27	3.5- 47	nd - 15
Cl	4.9 - 12.1	651.0 -4120.0	2 -8233	28 - 26700
F	(d)0.09 - 0.150	0.25- 0.55	0.75- 3.1	nd - 2.0
Cu	0.0 - 0.105	0.08- 0.14		0.006- 0.096
Zn	0.0 - 0.215	0.01- 0.07		0.006- 0.2
Rb	0.0 - 0.008	0.07- 0.60	0.6 - 10.0	
Sr	0.006- 0.802	0.79- 5.60	(e)3.2	

Fuente: (a) Ellis,A. (1969)

(b) de Grys,A.(1965)

(c) en Holland,H.(1978)

(d) rango de valores medios propuesto.

(e) un sólo valor.

un aumento inicial estabilizándose con posterioridad a la confluencia del Salado. Para la razón Rb/Sr, el Salado no presenta influencia a pesar del valor más bajo de ella en este río, influyendo en cambio en el valor de razón Ca/Sr que disminuye, estabilizándose después.

En ambos gráficos los puntos de muestreo en la absisa guardan entre sí una distancia aproximadamente proporcional a la de terreno.

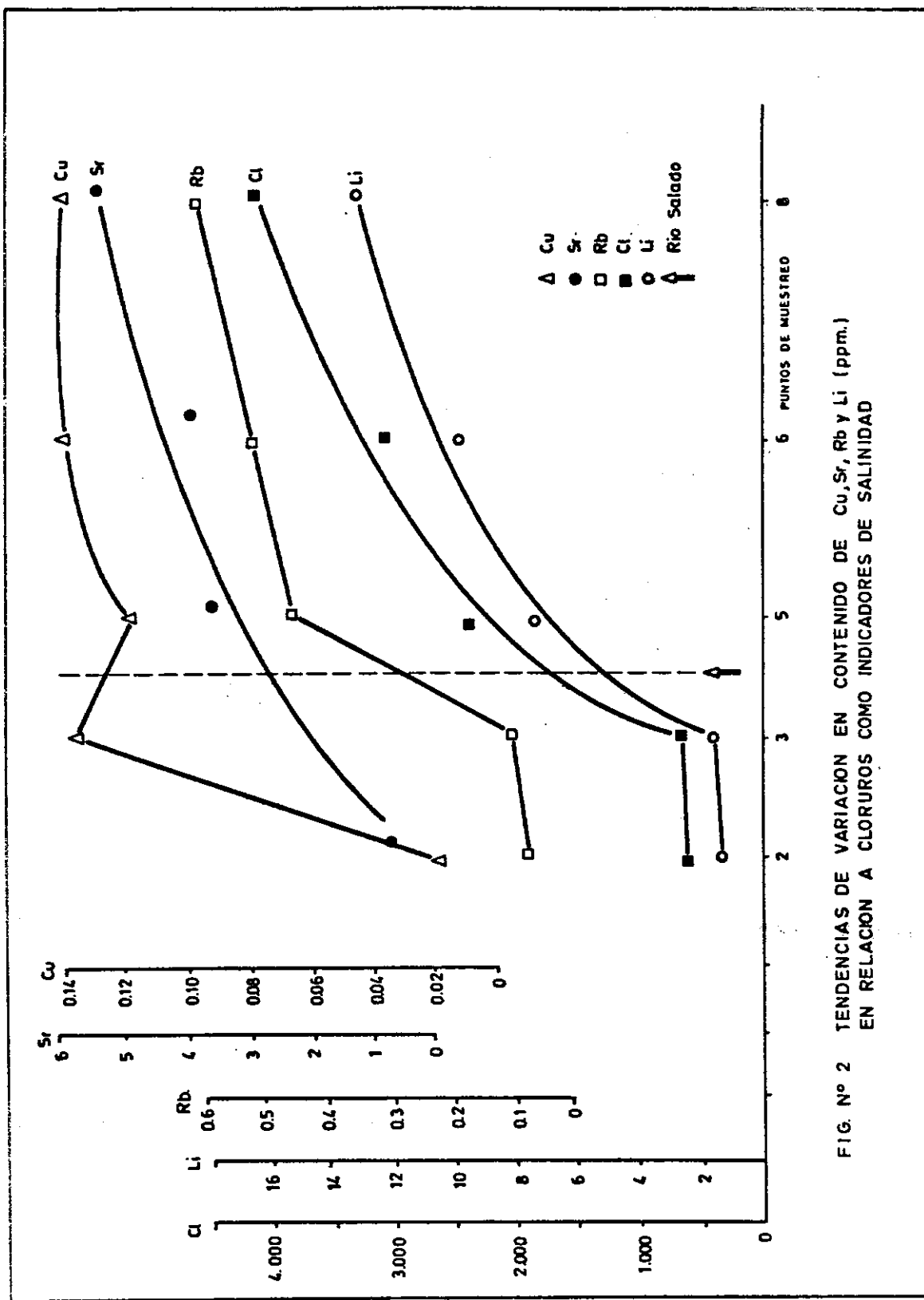


FIG. N° 2 TENDENCIAS DE VARIACION EN CONTENIDO DE Cu, Sr, Rb y Li (ppm.) EN RELACION A CLORUROS COMO INDICADORES DE SALINIDAD

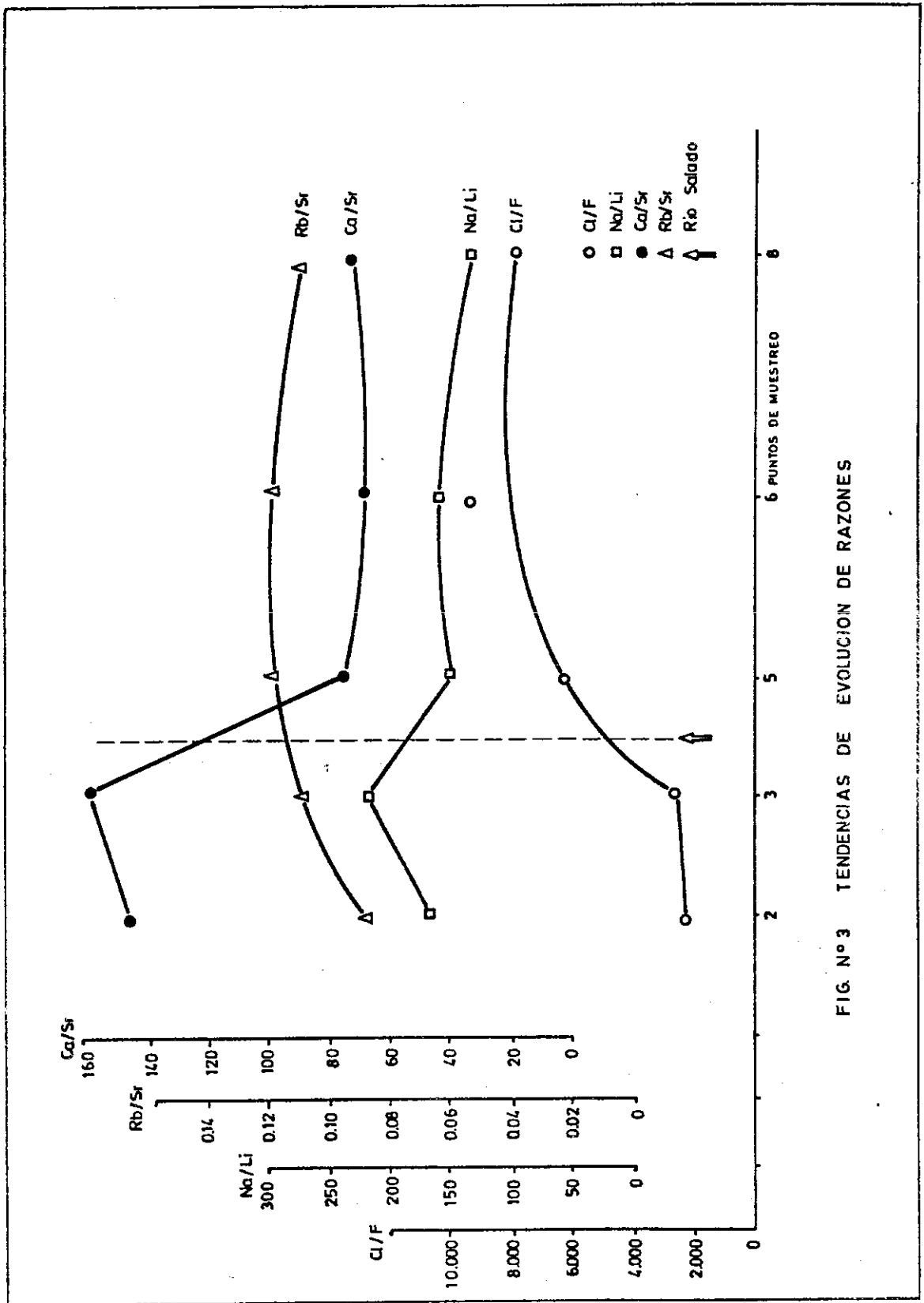


FIG. N° 3 TENDENCIAS DE EVOLUCION DE RAZONES

## TENDENCIAS DE COMPOSICION EN CATIONES Y ANIONES MAYORES

Utilizando los mismos puntos de muestreo referidos a las figuras 2 y 3 anteriores, la composición del río Loa en cationes y aniones principales tiende, durante su curso, hacia el vértice de cloruros en el triángulo de aniones y hacia el de Na + K en el triángulo de cationes (Fig. N°4).

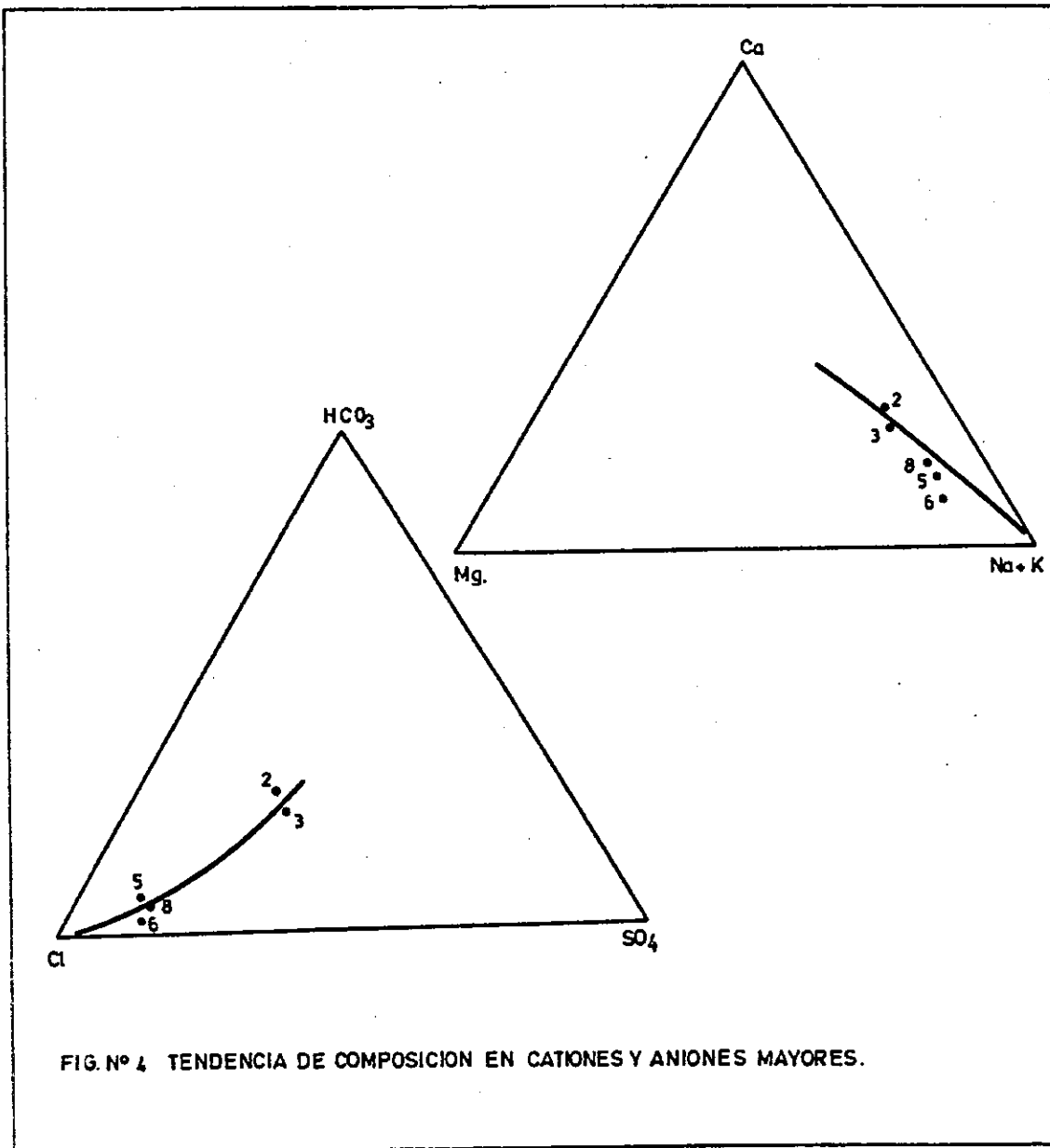
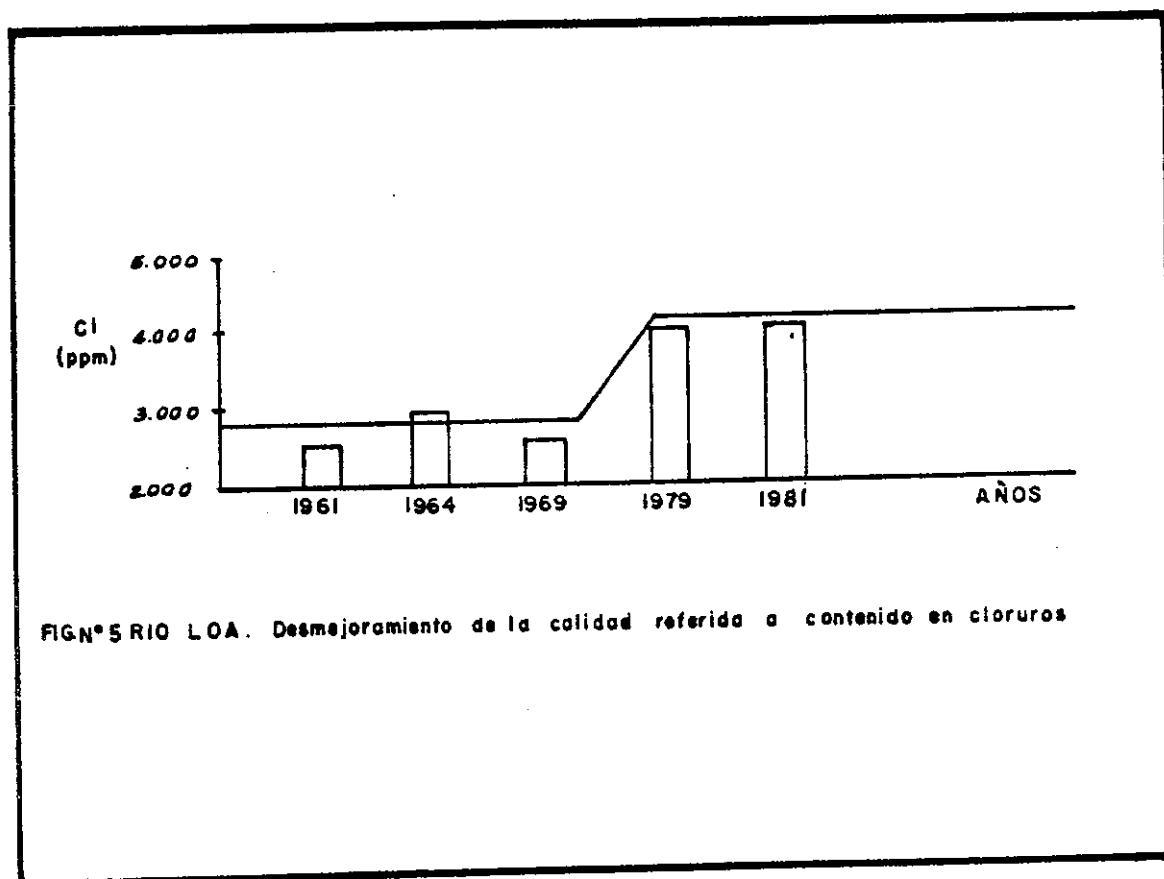


FIG. N° 4 TENDENCIA DE COMPOSICION EN CATIONES Y ANIONES MAYORES.

## MANEJO DE AGUAS E INFLUENCIA SOBRE SU CALIDAD

En los primeros años de la década del setenta se realizaron en el río Loa algunas obras como la aducción Lequena y la construcción del embalse Conchi. Sin otra intención que la de indicar la influencia de ellas en la calidad de esas aguas usadas para riego en el valle de Quillagua, aguas abajo de esas obras, se presenta en la Fig. N°5 la variación del contenido de cloruros, como indicador de calidad. Los valores para 1969, 1979 y 1981 fueron realizados en el mismo laboratorio y controlados por la misma persona.



## CONCLUSIONES

- 1.- En el Norte de Chile no se han desarrollado estudios hidrogeoquímicos tales como esta disciplina lo exige. En general, sólo se dispone de resultados de análisis químicos con poca e insuficiente información, sin seguimiento posterior para evaluar posibles variaciones y sin un tratamiento estadístico y gráfico adecuado.
- 2.- Por no disponerse, salvo contados casos, de información sobre elementos en trazas, se requiere programar su estudio en aguas y sedimentos correspondientes. Debe darse prioridad a aquellos que las condiciones geológicas indiquen como más probables contaminantes para el uso potable del agua.
- 3.- En un prototipo de estudio hidrogeoquímico en el río Loa, aparecen, en una primera corrida de muestreo, tendencias del Cu, Li, Rb, Sr y F a aumentar su contenido con el aumento de cloruros, elegido como guía de salinidad.
- 4.- Ubicando al río Loa, según su contenido de algunos elementos en trazas y de mayores, en un rango limitado en un extremo por la composición de un río mundial y por otro, por algunas aguas termominerales chilenas, aquel se acerca más a estas últimas participando por tanto con ellas los mismos problemas de su aprovechamiento.
- 5.- Obras de manejo de aguas efectuadas en el río Loa han desmejorado su calidad para riego aguas abajo, en particular en el valle de Quillagua.

RECONOCIMIENTO. Los trabajos referidos en esta comunicación son financiados por la Dirección de Investigaciones de la Universidad del Norte.



## REFERENCIAS

- ALONSO, H., 1979. Evolución salina del río Loa. II Congreso Geol. Chileno, Arica. V.2, p.D31-D48.
- BARNES, H., CZAMANKE, G., 1967. Solubilities and transport of ore minerals. En Barnes, ed.: Geochemistry of hydrothermal ore deposits. Holt, Rinehart, 334-378.
- DE GRYS, A., 1965. Some observation on the hot springs of central Chile. Water Resources Research V.1, N°3. p.415-428.
- ESPILDORA, B. et al., 1979. Estudio hidrológico y operacional del sistema Embalse Conchi-río Loa. M.O.P. Dirección de Riego.
- ELLIS, A., 1969. Survey for geothermal development in Northern Chile. Preliminary geochemistry report, El Tatio geothermal field. UNDP-Report. 27 p.
- FEDER, G., 1979. Geochemical survey of waters of Missouri. U.S. Geol. Surv. Prof. Paper 954-E. 77 p.
- GIGGENBACH, W. y GLOVER, R., 1975. The use of chemical indicators in the surveillance of volcanic activity affecting the crater lake on Mt Ruapehu, New Zealand. Bull Vulcan, V.39, N°1. p.70-81.
- GIGGENBACH, W., 1978. The isotopic composition of waters from the El Tatio geothermal field, Northern Chile. Geochim. Cosmochim. Acta V.42. p.979-988.
- GLOVER, R., 1975. Review of work on geochemical forecast of eruptions and interactions of seismic phenomena and geochemical indicators in the South Pacific area. Bull. Vulcan. V.39 N°1. p.146-157.
- HENRIQUEZ, H. y FALCON, E., 1975. Síntesis del potencial hidrogeológico de la I y II Regiones. Inst. de Invest. Geol. Chile. 6 p.
- HENRIQUEZ, H., 1978. Misión relativa al programa de cooperación subregional sobre arsénico y otros contaminantes en el agua en relación con el volcanismo cuaternario. UNESCO, Montevideo. 22 p.
- HELGESON, H., 1964. Complexing and hydrothermal ore deposition. Pergamon Press, N. York.
- HOLLAND, H., 1972. Granite, solutions and base metal deposits. Econ. Geol. V.67, p.281-301.

- IWASAKI, I., 1975. Geochemical indicators and seismic phenomena. Bull. Vulcan. V.39 N°1. p. 82-90.
- KLOHN, W., 1972. Hidrografía de las zonas desérticas de Chile. Contribución al Proyecto CHI-35, PNUD. 185 p.
- KRAUSKOPF, K., 1967. Introduction to geochemistry. Mc Graw-Hill. N.York.
- LANDREAU, A., LEMOINE, B., 1977. Carte de la qualité chimique des eaux souterraines de la France (1/1000000) B.R.G.M.
- MARKHININ, E. y BOZHKOVA, L., 1975. Bull.Vulcan. V.39, N°1. p. 104-111.
- MENYAILOV, I., 1975. Bull. Vulcan. V.39, N°1. p. 112-123.
- NASH, T., 1976. Fluid inclusion petrology. Data from porphyry copper deposits and applications to exploration. U.S.Geol. Surv. Prof. Paper 907-D. 15 p.
- NIEMEYER, H., 1967. Estudio de la contaminación del río Loa (manuscrito). Dirección de Riego, Santiago.
- PEÑA, H., 1970. Modelo hidrológico y de constitución química de la cuenca del río Loa. U.Católica de Chile, Santiago. (citado por Klhon).
- RICKERT, D., et al, 1976. Methodology for river-quality assessment with application to the Willamette river basin, Oregon. U.S.Geol.Surv. Circular 715-M. 53 p.
- ROEDDER, E., 1967. Fluid inclusions as samples of ore fluids en Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits. H.Barnes, ed. Holt, Rinehart Inc. p. 515-567.
- SAWKINS, F., 1964. Lead zinc ore deposits in the light of fluid inclusion studies, Providencia mines, Zacatecas, México. Econ. Geol. V. 59 p. 883-919.
- WENTZ, D., y DOAK STEELE, T., 1980. Analysis of stream quality in the Yampa river basin, Colorado and Wyoming. U.S.Geol. water Res. Investigations. p. 80-8.
- WHITE, D., 1958. Thermal waters of volcanic origin Geol.Soc.America Bull. V. 68, p. 1637-1658.