

CARACTERISTICAS GEOQUIMICAS Y ORIGEN DE LAS AGUAS DE LAS TERMAS DE CHILLAN

por

Alfredo Lahsen A.*

RESUMEN

Las aguas de las Termas de Chillan corresponden al tipo sulfatadas ácidas; además de sulfatos incluyen altas concentraciones de elementos alcalinos (Na, K) y alcalino térreos. Al igual que en los sistemas hidrotermales de vapor dominante (vapor seco), estas fuentes termales se habrían producido a partir de la evaporación en su subsuperficie, de una masa de agua en ebullición, a temperaturas superiores a los 200° C.

Un origen mediante tal mecanismo permite la incorporación en la fase vapor, de una gran cantidad de H₂S. A medida que asciende a la superficie el H₂S es oxidado a H₂SO₄. La acidez de este vapor facilita la disolución de los minerales de las rocas atravesadas, de este modo los constituyentes de las aguas provienen principalmente de las rocas.

ABSTRACT

The Termas de Chillán hot springs belong to the acid-sulfate type; in addition they are rich in alkaline (Na,K) and alkaline-earth (Ca, Mg) elements. Similarly to the vapor dominated (dry steam) hydrothermal systems, these springs would be produced by subsurface evaporation of a boiling mass of water, at temperatures above 200°C.

Such mechanism of origin allows the incorporation of large amounts of H₂S into the vapor phase. On its way to the surface the H₂S is oxidized to H₂SO₄. The acidity of the steam facilitates the dissolution of minerals present in the wall rocks; in this way the water constituents derive mainly from the country rocks.

INTRODUCCION

Las investigaciones geoquímicas de aguas y gases de áreas termales, han sido tradicionalmente empleadas en la determinación de los posibles orígenes tanto del calor, como de los constituyentes químicos de los fluidos descargados por estos sistemas hidrotermales. Estudios

* Departamento de Geología, Casilla 13518, Correo 21, Santiago, Chile.

de las razones isotópicas del oxígeno e hidrógeno han demostrado que la mayoría de los sistemas hidrotermales, incluso en aquellos directamente relacionados con actividad volcánica, el agua es predominantemente de origen meteórico, y que en ningún caso el agua magmática supera un 5% de la masa total del agua presente en los sistemas (CRAIG, 1963). Los estudios experimentales de reacciones agua-roca, a diferentes temperaturas y presiones, realizados por ELLIS y MAHON (1964, 1967) han demostrado que una alta proporción de los constituyentes químicos de aguas y vapores termales pueden ser extraídos de los minerales de las rocas atravesadas.

Las relaciones existentes entre la mineralogía de las rocas, los productos de alteración y la composición química de las soluciones constituyen una herramienta importante en la interpretación de las características físico-químicas de los sistemas geotérmicos en profundidad. Con este objeto se realizó, en mayo de 1976 un muestreo sistemático de las Termas de Chillán situadas en la parte sur del grupo volcánico de los Nevados del mismo nombre.

CARACTERISTICAS GEOLOGICAS DEL AREA

El rasgo geológico fundamental del área lo constituye el grupo volcánico de los Nevados de Chillán, ubicados en la Cordillera de los Andes, a unos 80 Km al sureste de la ciudad de Chillán; entre las latitudes $36^{\circ}47'$ y $36^{\circ}54'$ S y las longitudes $71^{\circ}20'$ y $71^{\circ}27'$ W. (Fig. 1).

Este grupo volcánico de edad Pleistoceno-Holoceno se ha desarrollado sobre una serie de lavas andesíticas y sedimentos piroclásticos, correspondientes a un antiguo estrato-volcán, probablemente del Plioceno. Posteriormente este volcán se colapsó y convirtió en una caldera; cuyos bordes apreciables en las fotografías aéreas muestran una forma elíptica de $7 \times 5,5$ Km. El eje mayor de esta caldera coincide con una línea NW, a lo largo de la cual se dispone una serie de centros de emisión de la actividad volcánica desarrollada desde el Pleistoceno hasta la actualidad.

El basamento de este grupo volcánico está constituido, al menos en la parte suroeste, por rocas intrusivas de carácter dioítico; en otros sectores es posible también que este basamento corresponda a rocas sedimentarias continentales y lavas asignables a las formaciones Cura Mallín o bien Abanico, reconocidas por GONZALEZ y VERGARA (1962) en los alrededores del área.

Los Nevados de Chillán han tenido una gran actividad eruptiva en tiempos históricos, la que se mantiene aún en la actualidad; en este grupo volcánico se destacan tres conos principales correspondientes de NW a SE al cerro Blanco, el Volcán Nuevo y el volcán Chillán.

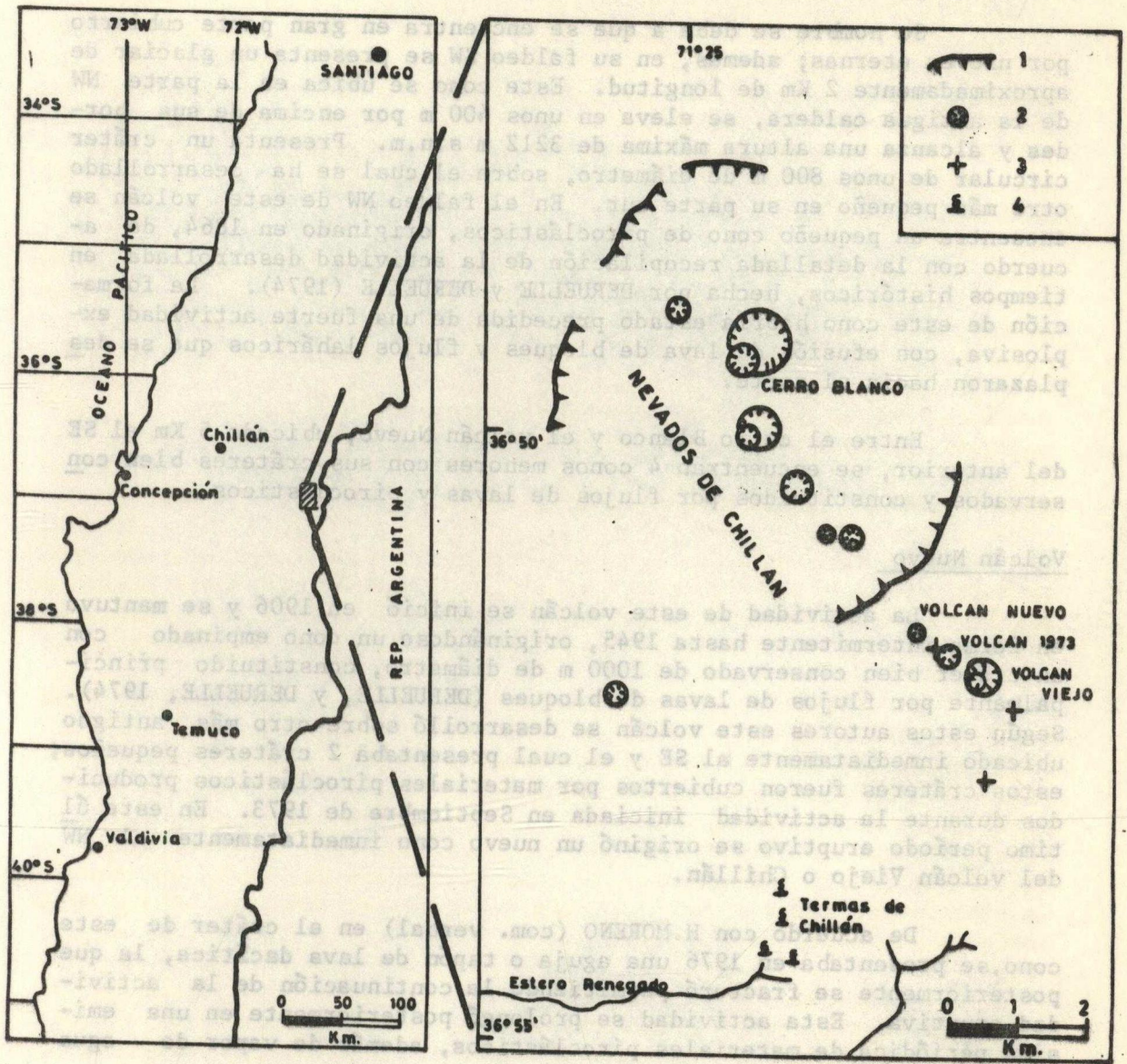


Fig. 1. Mapa de ubicación de los Nevados de Chillán y distribución de sus centros de emisión, adaptado de DERUELLE y DERUELLE (1974).
 1) Caldera, 2) cráteres, 3) fumarolas y 4) Termas de Chillán

Cerro Blanco o Nevado

Su nombre se debe a que se encuentra en gran parte cubierto por nieves eternas; además, en su faldeo SW se presenta un glaciar de aproximadamente 2 Km de longitud. Este cono se ubica en la parte NW de la antigua caldera, se eleva en unos 400 m por encima de sus bordes y alcanza una altura máxima de 3212 m s.n.m. Presenta un cráter circular de unos 800 m de diámetro, sobre el cual se ha desarrollado otro más pequeño en su parte sur. En el faldeo NW de este volcán se encuentra un pequeño cono de piroclásticos, originado en 1864, de acuerdo con la detallada recopilación de la actividad desarrollada en tiempos históricos, hecha por DERUELLE y DERUELLE (1974). La formación de este cono habría estado precedida de una fuerte actividad explosiva, con efusión de lava de bloques y flujos laháricos que se desplazaron hacia el norte.

Entre el cerro Blanco y el volcán Nuevo, ubicado 5 Km al SE del anterior, se encuentran 4 conos menores con sus cráteres bien conservados y constituidos por flujos de lavas y piroclásticos.

Volcán Nuevo

La actividad de este volcán se inició en 1906 y se mantuvo en forma intermitente hasta 1945, originándose un cono empinado con un cráter bien conservado de 1000 m de diámetro, constituido principalmente por flujos de lavas de bloques (DERUELLE, y DERUELLE, 1974). Según estos autores este volcán se desarrolló sobre otro más antiguo ubicado inmediatamente al SE y el cual presentaba 2 cráteres pequeños; estos cráteres fueron cubiertos por materiales piroclásticos producidos durante la actividad iniciada en Septiembre de 1973. En este último período eruptivo se originó un nuevo cono inmediatamente al NW del volcán Viejo o Chillán.

De acuerdo con H.MORENO (com. verbal) en el cráter de este cono, se presentaba en 1976 una aguja o tapón de lava dacítica, la que posteriormente se fracturó permitiendo la continuación de la actividad eruptiva. Esta actividad se prolongó posteriormente en una emisión periódica de materiales piroclásticos, además de vapor de agua y gases.

Volcán Viejo o Chillán

Corresponde al cono desarrollado en la parte SE de la caldera, alcanza una altura de 3122 m s.n.m. Está constituido por sedimentos piroclásticos, flujos de lavas de composición dacítica y andesítica; culmina en un cráter elíptico de unos 800 m de diámetro máximo. Dentro de este cráter se observan tres cráteres menores de los cuales, aquel ubicado en el extremo oeste del cráter original parece ser el más reciente.

Además de los conos anteriormente señalados, se encuentran otros conos adventicios de tamaños pequeños ubicados en los faldeos este y oeste de la estructura principal.

ACTIVIDAD HIDROTHERMAL

La actividad superficial correspondiente a las Termas de Chillán se manifiesta en la falda suroeste del volcán Chillán (71°24'2" W - 36°54'20" S), de las nacientes del Cerro Renegado y a una altura de 1725 m s.n.m. Las fuentes termales se distribuyen en tres pequeñas áreas que cubren una superficie total aproximada de 0,5 Km²; estas fuentes consisten en una serie de vertientes y pozas de agua y barro, hervores, hidrocambios se encuentra una gran cantidad de pequeñas fumarolas, algunas emitidas a presión, y en las cuales fueron registradas temperaturas de hasta 95°C.

Debido a la acción de las manifestaciones termales se ha producido una fuerte alteración hidrotermal en las pedreguitas y aglomerados volcánicos a través de los cuales los fluidos alcanzan la superficie. Esta alteración ha dado origen a la formación de áreas totalmente azúlicadas, cloritizadas y silicificadas; en algunos sectores se ha producido una abundante depositación de limonita, sílice amorfa y algo de pirita. Además es posible observar la formación de delgadas costras de azufre y pequeñas cantidades de sulfato de cobre precipitado conjuntamente con otros depósitos salinos indeterminados.

MUESTREO Y ANALISIS

Las fuentes termales seleccionadas en el muestreo corresponden a las manifestaciones de mayor caudal y temperatura; en esta forma se ha tratado de evitar en lo posible, aquellas aguas que han sufrido una mayor dilución con aguas superficiales frías, una prolongada evaporación o bien la precipitación de algunos de sus constituyentes, debido a la disminución de la temperatura. Cabe destacar que en general las fuentes termales de Chillán presentan muy bajos caudales, los cuales raramente exceden de 0,1 lt./seg.

Las muestras de agua fueron tomadas en botellas de polietileno de 1lt. y los análisis fueron realizados por H. Cusicanqui en el Laboratorio Químico del I.I.G., de acuerdo con los métodos analíticos señalados principalmente por RAINWATER y THATCHER (1960) y ELLIS et al. (1968).

RESULTADOS DE LOS ANALISIS

Los resultados de los análisis aparecen en el Cuadro I. De acuerdo con éstos, las aguas de las Termas de Chillán corresponden a soluciones sulfatadas fuertemente ácidas con excepción de la muestra Ch. 3 que presenta un pH=5,87. Además de los sulfatos se encuentran disueltos en forma significativa elementos alcalinos y alcalinos térreos.

CUADRO I COMPOSICION QUIMICA DE LAS AGUAS DE LAS TERMAS DE CHILLAN

MUESTRA	Ch.1	Ch.2	Ch.3	Ch.4
Temp. °C.	92,0	85,0	88,0	89,0
pHa 16°C	2,40	2,91	5,87	3,10
Concentrac. en p.p.m.				
SiO ₂	339,00	201,00	215,00	130,00
Al	12,00	13,00	0,10	3,00
Fe	48,00	14,00	1,50	3,30
Ca	140,00	29,00	86,00	68,00
Mg	65,00	6,30	28,00	18,00
Na	58,00	40,00	55,00	31,00
K	19,00	8,30	16,00	8,40
Li	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Cs	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Rb	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Sr	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
As	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05
F	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10
Cl	3,00	1,30	1,50	1,10
HCO ₃	0	0	0	0
SO ₄	206,00	335,00	450,00	373,00
NH ₃	2,90	3,70	1,50	1,20
B	0,90	0,40	0,80	0,18
Razones				
Cl/F	30,00	13,00	15,00	11,00
Cl/B	3,33	3,25	1,88	6,11
Cl/SO ₄	0,002	0,003	0,003	0,003

Los resultados de estos análisis concuerdan en términos generales con la composición señalada por De GRYS (1965) para estas termas; a pesar de que todos los contenidos de Cl determinados en el presente estudio son muy inferiores al contenido dado por dicha autora.

DISCUSION DE LOS RESULTADOS

Contenidos de Halógenos y sulfatos.

Los contenidos de cloruros varían entre 1,1 y 3,0 ppm., estos valores son notablemente bajos comparados con los contenidos de cloruros o (HCl) determinados en diversas fumarolas volcánicas como puede verse en el Cuadro II. Las fumarolas del volcán Misti, Perú presentan un promedio de 3778 ppm de Cl (BIRNIE y HALL, 1974); las fumarolas de una serie de volcanes activos de Centro América tienen un promedio cercano a los 4800 ppm de Cl, con valores de hasta 5×10^4 ppm de Cl. Se ha observado que las concentraciones de cloruros en los condensados de estas fumarolas varían de acuerdo con su ubicación respecto de los centros de emisión y con los períodos eruptivos (STOIBER y ROSE, 1970).

Estos autores han observado además que la razón Cl/SO_4 decrece al acercarse un período eruptivo, en el cual esta razón alcanza su valor mínimo, para aumentar de nuevo una vez pasada la fase de actividad. Esta variación de la razón Cl/SO_4 se debe en parte a un aumento del H_2S durante la erupción y en parte a una disminución del aporte de HCl y cloruros alcalinos. Una explicación a este hecho sería la considerablemente mayor solubilidad del HCl y HF en el magma, en comparación con los gases de azufre (H_2S y SO_2), los cuales tenderían a evaporarse primero del magma (KRAUSKOPF, 1948).

Sin embargo, los contenidos de Cl en las fumarolas de volcanes en actividad nunca alcanzan valores tan bajos como los encontrados en las aguas de las Termas de Chillán, muestreadas durante un período de actividad cinerítica del volcán; lo mismo ocurre con los contenidos de fluoruros o (HF) como veremos más adelante. El significativo aporte de los gases magmáticos a las fumarolas volcánicas en cuanto a H_2S , halógenos y otros constituyentes, de acuerdo con las evidencias aportadas entre otros por KRAUSKOPF (1948), NOGUCHI y KAMIYA, (1963), WHITE y WARING, (1963), ELSKENS *et al.*, (1969), no se refleja en los análisis de las aguas de las Termas de Chillán. Considerando especialmente los contenidos de cloruros y otros halógenos, podría concluirse que estas aguas no están relacionadas en forma directa con los gases magmáticos del volcán.

En términos generales la composición química de las Termas de Chillán concuerda con las aguas sulfatadas ácidas definidas por WHITE *et al.*, (1963), en estas aguas las razones Cl/SO_4 varían entre

0,2 y 0,0002. También son semejantes en su composición química con las aguas o condensados de los campos geotérmicos de vapor dominante o vapor seco (WHITE *et al.*, 1971). En este tipo de sistemas hidrotermales, entre los cuales se cuentan The Geysers y Matsukawa (Cuadro II), la separación de la fase líquida de la gaseosa se produce en subsuperficie (FACCA y TONANI, 1964, 1967; GOGUEL, 1970); un mecanismo de esta naturaleza podría explicar también las características químicas de las aguas sulfatadas ácidas.

La química de estas aguas difiere notablemente de aquellas provenientes de sistemas geotermiales de agua caliente o de vapor saturado, las cuales corresponden generalmente a soluciones cloruradas cercanamente neutras. En estos sistemas debido principalmente a su estructura geológica, condiciones de temperatura y de recarga de agua no se separan las fases líquido y vapor en subsuperficie, como ocurre en los campos geotérmicos de vapor dominante. Para los efectos de comparación se incluyen en el Cuadro II análisis de fuentes termiales representativas de las áreas de Puchuldiza y Surirí (Norte de Chile); las cuales corresponden a sistemas de agua caliente.

Al producirse la ebullición en subsuperficie, los halógenos debido a su menor volatilidad, se distribuyen de preferencia en la fase líquida, en tanto que en la fase gaseosa se escapa un gran porcentaje de H_2S . Este vapor al alcanzar los niveles más superficiales en parte se condensa, ya sea por la disminución normal de la temperatura o bien al mezclarse con aguas subterráneas más superficiales o frías, dando así origen a fumarolas gaseosas y a vertientes calientes o en ebullición.

A medida que el vapor asciende a la superficie el H_2S puede reaccionar con el oxígeno atmosférico incluido en las aguas superficiales y formar ácido sulfúrico, lo cual explicaría los altos contenidos de sulfatos y los bajos valores de pH que caracterizan estas aguas. A su vez, la presencia de H_2SO_4 facilitaría la acción disolvente del agua sobre los minerales de las rocas atravesadas; de este modo se produciría la presencia de la mayoría de los iones metálicos, tales como Fe, Al, Mg y Na en las soluciones.

Los contenidos de fluor en las aguas de las Termas de Chillán son también bastante bajos (0,1 ppm) en comparación con las concentraciones encontradas en las fumarolas volcánicas como puede apreciarse en el Cuadro II. Sin embargo, estas concentraciones son concordantes con los bajos contenidos de cloruros de modo que las razones Cl/F tienen un rango de variación de 11 a 30; valores que están dentro del orden de magnitud de estas razones en las fumarolas volcánicas.

En efecto la mayoría de los casos conocidos la razón Cl / F es mayor que 1 con un amplio rango de variación alcanzando valores de

C U A D R O II

	Temp. °C	pH	K	Na	Ca	Mg	Fe	Al	SiO ₂	Cl	F	SO ₄
Matsukawa (1) Japón	153	3,5	50,0	80,0	28,8	10,0	67,0	4,3	244	5,4	n.d.	534
The Geysers (2) California	eb.	1,8	5,0	12,0	47,0	281,0	63,0	16,0	225	0,5	n.d.	5.710
Norris Basin (2a) Yellowstone, Wyo.	90	1,97	3,0	2,0	2,2	0,0	0,8	2,4	109	15,0	n.d.	758
Sulphurspring (2b) N. Mexico	+65	1,9	24,0	6,7	185,0	52,0	33,0	56,0	216	3,5	1,1	1.570
Volcán Misti Perú	100-125	1,2	2,6	6,1	5,4	2,4	2,4	n.d.	n.d.	3.778,	n.d.	n.d.
Vn. Santiaguito (4) Guatemala	280	n.d.	10,6	15,4	27,3	9,8	n.d.	n.d.	n.d.	3.417,	88,5	516
Suriri (5) Chile	82	8,1	187,0	1.115,0	98,0	8,0	n.d.	n.d.	157	1.780,	n.d.	215
Puchuldiza (5a) Chile	86	7,54	109,0	1.234,0	55,0	6,2	n.d.	n.d.	266	2.120	2,6	81,0

N.d.= no determinado

(1) Pozo N°1 ; análisis incluido en FUJII y AKENO (1970)

(2) Fuente termal; análisis incluido en WHITE et al., (1963) col. 1, p. F. 46., 2a) y 2b) cols.: 3 y 5 p. F46 de los mismos autores.

(3) Promedio aritmético de 5 fumarolas analizadas por BIRNIE y HALL (1974)

(4) Promedio aritmético de análisis en 4 fumarolas, STOLBER y ROSE (1970)

(5) Fuente termal incluida en LAHSEN 91974) Tabla 2 p.B110; 5a) Fuente termal N°137 incluida en la misma tabla

hasta 2.000. Razones Cl/F menores que 100 se han determinado en los condensados de las fumarolas del Katmai, Alaska, del Showa-shinzan, Japón (WHITE y WARING, 1963), de los volcanes Kujū y Nasudake, Japón (HONDA y MIZUTANI, 1968). En cambio estas razones varían entre 100 y 2000 en las fumarolas de los volcanes de Centro América investigados por STOIBER y ROSE (1970); en las fumarolas de algunos volcanes de White Island, Nueva Zelandia, en el Kilauea Iki, Hawai y en el Hekla, Islandia (WHITE y WARING op. cit.).

Considerando el amplio margen de variación de los contenidos de Cl y F en las fumarolas volcánicas es posible concluir que estos halógenos han sido incorporados en pequeñas cantidades al vapor, al se pararse éste de la fase líquida.

Metales Alcalinos y Alcalinos térreos.

Las concentraciones de estos elementos en las aguas de las Termas de Chillán (Cuadro I), corresponden mayoritariamente a Ca, Mg, Na y K; el origen de estos elementos podría deberse a una fuerte lixiviación de las rocas atravesadas por las soluciones o vapores fuertemente ácidos, a causa de la presencia de H_2SO_4 .

A modo de comparación se incluyen en el Cuadro III las razones Ca/Mg, Na/K y $(Ca + Mg) / (Na + K)$ de las cuatro fuentes termales analizadas, como también el promedio de estas mismas razones calculadas a partir de los análisis químicos de dacitas y andesitas de los Nevados de Chillán (DERUELLE y DERUELLE, 1974 p. 101). Las razones Ca/Mg de las fuentes termales y de las dacitas son prácticamente idénticas; una similar concordancia entre los condensados de las fumarolas y las rocas que atraviesan han sido observada en el volcán Showa-Shinzan, Japón (WHITE y WARING, 1963), en varios volcanes de Centro América (STOIBER y ROSE, 1970), y en el volcán Misti de Perú (BIRNIE y HALL, 1974), todos estos autores atribuyen este hecho a una profunda lixiviación de las rocas a causa de fluidos ácidos.

En cambio la razón Ca/Mg de las andesitas es menor de la mitad del valor determinado en las aguas termales; este aparente enriquecimiento relativo en Ca que muestran las aguas respecto de las andesitas, podría indicar una menor solubilidad del magnesio, de modo que se ría removido en menor proporción que el calcio. Sin embargo, considerando la composición química global de las fuentes termales y los ejemplos citados anteriormente lo más probable es que las dacitas sean las rocas predominantes a través de las cuales circulan las soluciones, y que la contribución de las andesitas a la composición química de las aguas sea mínima.

La razón Na/K promedio de las aguas termales es más del doble de esta razón en las dacitas de los Nevados de Chillán (Cuadro III).

CUADRO III

	Na/K	Ca/Mg	(Ca+Mg)/(Na+K)
Termas de Chillán (1)	3,75	3,41	1,79
Dacitas, Nevados de Chillán (2)	1,38	3,46	0,62
Andesitas, Nev. de Chillán (2a)	1,90	1,48	1,88

- (1) Razones promedio de las 4 muestras incluidas en el Cuadro I
 (2) Razones promedio de 8 muestras, (2a) promedio de dos muestras analizadas (DERUELLE y DERUELLE, 1974, Cuadro III p. 101).

Este enriquecimiento relativo en sodio que presentan las aguas pueden ser atribuido principalmente a su mayor solubilidad; de este modo se ría lixiviado de las rocas en una mayor proporción que el potasio.

En parte también, la disminución del potasio en las aguas con respecto a las rocas podría deberse a que este elemento es más fácilmente incorporado a los minerales de alteración hidrotermal, en forma especial en las arcillas.

Un aporte extra de Na a través de gases magmáticos no podría tener una incidencia tan grande como para explicar los valores de razones Na/K en las aguas; un aporte magmático de sodio tendría que ser en forma de NaCl gaseoso, sin embargo este aporte sería muy poco significativo considerando los bajos contenidos de cloruros que presentan estas aguas.

CONCLUSIONES

Las características químicas de las aguas de las Termas de Chillán proporcionan una serie de antecedentes acerca del origen de sus elementos constitutivos; de las reacciones del sistema agua/roca; y del modelo termodinámico que rige este sistema hidrotermal. De acuerdo con tales antecedentes es posible destacar las siguientes conclusiones principales:

- Estas aguas corresponden al tipo sulfatadas ácidas, caracterizadas por sus bajos contenidos de cloruros, altas concentraciones de sulfatos y valores de pH generalmente inferiores a 4.

- Un posible mecanismo para explicar la química de este tipo de fuentes termales es que ellas provengan de la ebullición en subsuperficie de una masa de agua caliente a más de 200°C. En esta forma se mantendrían en solución en las aguas originales prácticamente la

totalidad de sus constituyentes, con excepción del H_2S que debido a su alta volatilidad pasaría en una gran proporción a la fase vapor, conjuntamente con pequeñas cantidades de Cl y F.

- Al ascender hacia la superficie este vapor se mezcla con aguas subterráneas más superficiales, permitiendo así la oxidación del H_2S en H_2SO_4 y la lixiviación de las paredes rocosas con la consiguiente disolución de los iones metálicos y su inclusión en las aguas.

- La similitud entre las razones Ca/Mg de las fuentes termales (3,41 en promedio) y las dacitas de los Nevados de Chillán (3.46 en promedio), confirman el hecho que la mayor parte de los elementos disueltos son el resultado de la interacción agua/roca a altas temperaturas y por otra parte, que las dacitas serían el tipo petrográfico predominante en los niveles superiores de este grupo volcánico.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Instituto de Investigaciones Geológicas por los análisis de las muestras, en especial al Ing. Sr. Hernán Cusicanqui Jefe del Laboratorio Químico de dicho instituto, con quien el autor tuvo oportunidad de discutir los resultados de los análisis. Asimismo se agradece al profesor Dr. Leopoldo López quien aportó valiosas sugerencias en la revisión del manuscrito.

REFERENCIAS

- BIRNIE, R.W. y HALL, J. H., (1974). The Geochemistry of El Misti Volcano Perú. Fumaroles. IAVCEI. Int. Symp. Volc., Santiago Chile; Pre-print.
- De GRYS A., (1965). Some observations on the Hot Springs of Central Chile Water Res. Research Vol. N°3, p. 415-428.
- DERUELLE, B., y DERUELLE, J., (1974). Los volcanes cuaternarios de los Nevados de Chillán (Chile Central) y reseña sobre el volcanismo cuaternario de los Andes de Chile. Est. Geol. Inst. Lucas Mallada, C.S.I.C. España, Vol. XXX p. 91-108
- ELLIS, A. J. y MAHON, V. A., (1964). Natural hydrothermal Systems and hot water/rock interactions. Geochim. et Cosmochim. Acta, 28; p. 1323-1357.
- ELLIS, A. J., y MAHON, V. A. (1967). Natural hydrothermal systems and experimental hot water/rock interaction (Part. II). Geochim. et Cosmochim. Acta, 31, p. 519-538.
- ELLIS, A. J., MAHON, V.A., y Ritchie, J. A., (1968). Methods for Collection and analysis of Geothermal Fluids; N.Z.D.S.I.R. Report N°CD-2103.

- ELSKENS, I., TAZIEFF, H., y TONANI, F., (1969). Investigations nouvelles sur le gaz volcaniques. Bull. Volcanol. 23, p. 523 - 574.
- FACCA, G. y TONANI, F., (1964). Theory and Technology of a geothermal field. Bull. Volc., Vol. XXVII.
- FACCA, G. y TONANI, F., (1967). The self-sealing geothermal field. Bull. Volcanol. Vol. XXX, p. 271-273.
- FUJII, Y. y AKENO, T., (1970). Chemical Prospecting of Steam and Hot Water in the Matsukawa Geothermal Area. Proc. U. N. Symp. Dev. and Util. Geothermal Res. Geothermics. Vol. 2. P. 2, p. 1416-1425.
- GOGUEL, J., (1970). Le Rôle de la convection dans la Formation des Gisements Géothermiques Proc. U.N. Symp. Dev. and Util of Geothermal Res. Geothermics Vol. 2 part. 1. p. 615-621.
- GONZALEZ, O. y VERGARA, M., (1962). Reconocimiento geológico de la Cordillera de los Andes entre los paralelos 35° y 38° latitud Sur; Univ. de Chile, Fac. Cs. Fis. y Mat., Inst. Geol. Anales, Vol. 19, p. 19-121.
- HONDA, F. y MIZUTANI, Y., (1968). Silicon content of Fumarolic gases and Formation of a siliceous sublimate. Geochem. Journ., Vol. 2 p. 1-9
- IWASAKI, H., HIRAYAMA, M., KATSURA, T., OZAWA, T., OSSAKA, J. KAMADA, M. y MATSUIMOTO, H., (1964). Alteration of rock by volcanic gas in Japan; Bull Volcanol., V. 27, p. 65-78.
- KRAUSKOPF, K. B., (1948). Mechanism of eruption at Paricutin Volcano Mexico; Geol. Soc. Amer. Bull., V. 59, p. 711-731.
- LAHSEN, A., (1976). La actividad geotermal y sus relaciones con la tectónica y el volcanismo en el norte de Chile. Depto. Geol., Univ. de Chile. I^{er} Congr. Geol. Chileno, Tomo I, p. B-105-B-127.
- NOGUCHI, K. y KAMIYA, H., (1963). Prediction of volcanic eruption by measuring the chemical composition and amount of gases. Bull Volcan. V. 26, p. 367-378.
- RAINWATER, F. H., y THATCHER, L., (1960). Methods for Collection and Analysis of water Samples. U. S. Geol. Surv. Water Supply Paper N°1454.

- STOIBER, R. E. y ROSE, W. I., (1970), The Geochemistry of Central American Volcanic Gas Condensates. Geol. Soc. Amer. Bull., V. 81, p. 2891-2912.
- WHITE, E., HERN, J. D. y WARING, G. A., (1963). Chemical composition of subsurface waters; U.S. Geol. Survey Prof. Paper 440-F. 27 pags.
- WHITE, D. E., MUFFLER, L. J., TRUESDELL, A. H., (1971). Vapor dominated hydrothermal systems, compared with hot-water systems. Econ. Geol. Vol. 66, p. 75-97.
- WHITE, D. E. , y WARING, G. A., (1963). Volcanic emanations. U.S. Geol. Survey Prof. Paper, 440-K, 27 pags.