

MODELO GEOTERMICO PRELIMINAR DE AREAS VOLCANICAS DEL ECUADOR, A PARTIR DE ESTUDIOS QUIMICOS E ISOTOPICOS DE MANIFESTACIONES TERMALES

E. ALMEIDA, G. SANDOVAL
Instituto Ecuatoriano de Electrificación,
Quito, Ecuador

C. PANICHI, P. NOTO, L. BELLUCCI
Istituto Internazionale per le Ricerche Geotermiche,
Consiglio Nazionale delle Ricerche,
Pisa, Italia

Resumen-Abstract

MODELO GEOTERMICO PRELIMINAR DE AREAS VOLCANICAS DEL ECUADOR, A PARTIR DE ESTUDIOS QUIMICOS E ISOTOPICOS DE MANIFESTACIONES TERMALES.

A partir de 1986 se muestrearon y analizaron las aguas y gases de ocho áreas geotérmicas, para establecer su composición química e isotópica. En Chachimbiro y Cuicocha, se observan enriquecimientos de hasta el 5% en ^{18}O y 20% en Deuterio. La evaporación de una hipotética agua geotérmica profunda, desde 240°C hasta la temperatura en superficie, puede ser responsable de las variaciones isotópicas observadas en Chachimbiro. Por otra parte, en Cuicocha, un proceso de mezcla entre agua subterránea caliente y agua fresca de una laguna es responsable de los valores observados. En otras áreas, la composición isotópica de las aguas termales corresponde esencialmente a aguas meteóricas que caen a diferentes altitudes, desde 2500 hasta 4200 m sobre el nivel del mar. Las relaciones Na/K indican temperaturas del reservorio de aproximadamente 240, 210 y 200°C, para aguas cloruradas que emergen en las áreas geotérmicas de Chachimbiro, Cuenca y Papallacta respectivamente. En la caldera de Chalupas, los datos no permiten hacer ninguna hipótesis razonable sobre la existencia de un acuífero profundo de alta temperatura. Muestras procedentes del volcán Tungurahua son de aguas sulfatadas-ácidas, que tienen una composición isotópica concordante con aguas calentadas por gases a temperaturas de 200°C aproximadamente. En el área de Chimborazo, la reducida cantidad de muestras disponibles no permiten dar ninguna información acerca de sus características termales. En Tufiño, las aguas provienen de acuíferos superficiales modificados por gases calientes, cuyos geotermómetros dan temperaturas de 230°C.

PRELIMINARY GEOTHERMAL MODEL OF VOLCANIC AREAS IN ECUADOR BASED ON CHEMICAL AND ISOTOPIC INVESTIGATION OF THERMAL INDICATORS.

Since 1986, the waters and gases of eight geothermal areas have been sampled and analysed to establish their chemical and isotopic composition. In Chachimbiro and Cuicocha ^{18}O enrichment up to 5% and deuterium enrichment up to 20% have been observed. The isotopic variations seen in Chachimbiro could be explained by hypothetical deep geothermal water with a temperature range from 240°C to surface temperature. The values observed in Cuicocha, on the other hand, are due to mixing of hot groundwater with fresh lagoon water. In other areas, the isotopic composition of the thermal waters basically corresponds to that of meteoric water falling from various altitudes ranging from 2500 to 4200 m above sea level. The Na/K ratios indicate reservoir temperatures for the chloride waters emerging in the Chachimbiro, Cuenca and Papallacta geothermal areas of approximately 240°C, 210°C and 200°C, respectively. From the data on the Chalupas caldera it is impossible to construct any reasonable theory regarding the presence of a deep, high-temperature aquifer. Tungurahua volcano samples consist of sulphuric

acid water with an isotopic composition similar to waters evaporating at about 200°C. The number of samples from the Chimborazo area was too low to justify any assumptions about the thermal characteristics of the water. The waters in Tufiño originate in surface aquifers modified by hot gases registering 230°C on the geothermometers.

1 INTRODUCCION

En el marco del Programa de Exploración de los Recursos Geotérmicos de la República del Ecuador, ejecutado por INECEL, se han efectuado estudios geocientíficos exploratorios en las Áreas de Tufiño, Chachimbiro, Cuicocha, Papallacta, Chalupas, Tungurahua, Chimborazo y Cuenca, a fin de determinar las posibilidades de utilización del recurso geotérmico en la generación eléctrica. Parte importante de estos estudios, constituyen las investigaciones geoquímicas e isotópicas llevadas a cabo con el apoyo de la Organización Internacional de Energía Atómica (OIEA), a través del Contrato de Investigación 3991/IG, suscrito con INECEL. Los resultados finales de estas investigaciones se resumen en este documento.

2 SITUACION GEOLOGICA REGIONAL

El margen continental activo del Ecuador es caracterizado por la subducción de la placa Nazca, que transporta a la Cordillera de Carnegie creada por el paso de la Nazca sobre el punto caliente Galápagos. La subducción de Nazca y Carnegie es muy importante en la evolución de la Cordillera de los Andes, particularmente de su volcanismo. El Ecuador continental se divide en tres regiones: Llanura costanera (Costa), Cordillera de los Andes (Sierra) y Cuenca superior amazónica (Oriente).

La Costa esta' formada por la parte emergida de un prisma acrecionado, constituido por basaltos toleíticos cretácicos que representan corteza oceánica [1] y sedimentos volcanoclásticos que yacen bajo sedimentos pertenecientes a cuencas terciarias y cuaternarias (Figura 1).

La Sierra tiene en su mitad septentrional dos cordilleras paralelas, la Occidental y la Real, separadas por un valle angosto conocido como Depresión Interandina. La mitad meridional, es una cordillera de menor altura y sin un valle central. La Occidental es formada por rocas volcánicas básicas e intermedias de edad cretácica, emplazadas en un ambiente submarino (arco volcánico oceánico), y cubiertas de sedimentos pelágicos. La Real es un cinturón metamórfico barrowiano, cuyos protolitos son sedimentos de plataforma y pendiente continental metamorfizados en el Cretácico y Terciario inferior [2].

El Oriente forma parte de la cuenca amazónica; tiene un basamento precámbrico sobre el cual se encuentran potentes depósitos sedimentarios marinos de plataforma continental, sedimentos lacustres y detríticos continentales.

Los terrenos volcánicos continentales se extienden a lo largo de la Sierra, con un ancho promedio de 80 km. La actividad terciaria fue importante en toda la cordillera, en tanto que la cuaternaria esta' restringida a la mitad septentrional, donde se localizan casi todas las áreas geotérmicas estudiadas (Figura 1).

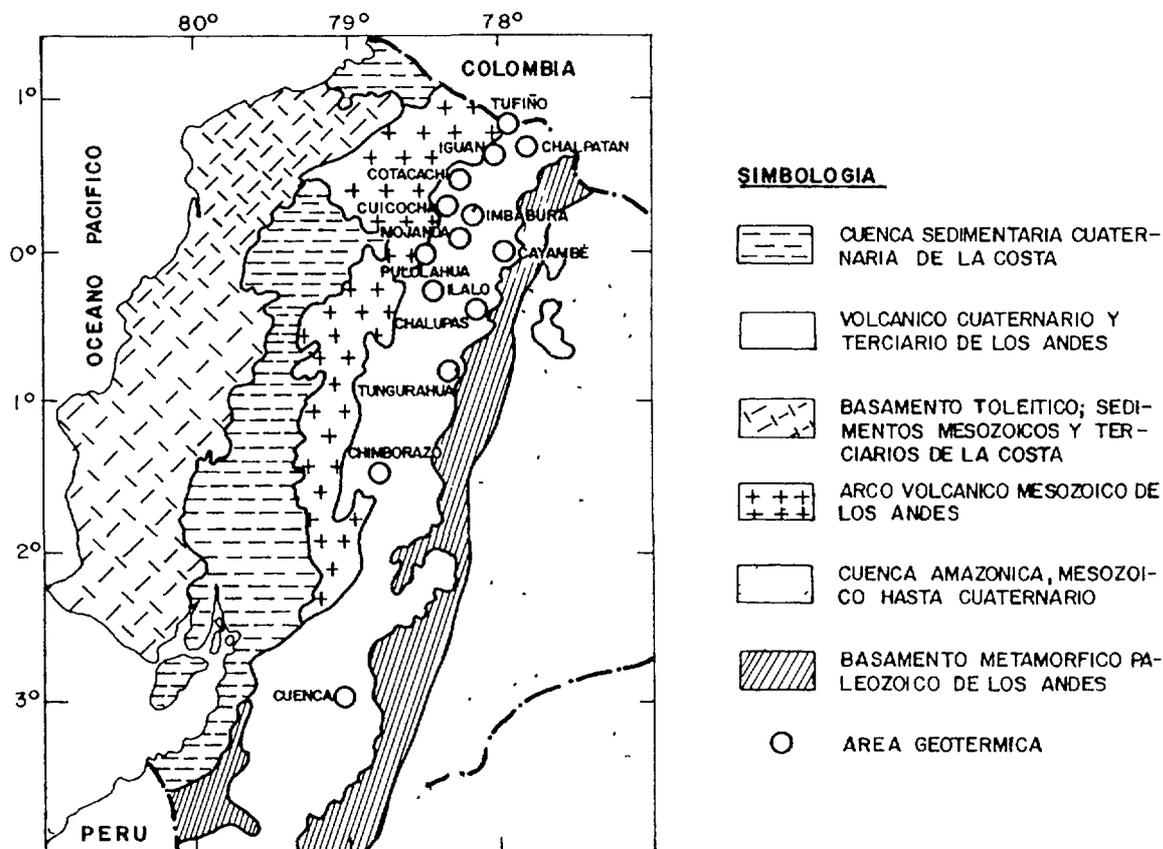


FIGURA 1. ESQUEMA GEOLOGICO DEL ECUADOR

El volcanismo durante el Cuaternario es muy importante; han sido identificados aproximadamente 200 centros de emisión [3] y muchos de ellos presentan una evolución magmática muy desarrollada. Los volcanes más voluminosos y activos se caracterizan por una compleja alternancia de lavas básicas e intermedias, domos ácidos y productos piroclásticos de composiciones dacíticas y riolíticas. El volcanismo en la parte meridional de la Sierra es fundamentalmente terciario [4, 5] y ha sido poco estudiado.

3 ASPECTOS QUIMICOS E ISOTOPICOS

3.1 TUFINO

Se encuentra en la frontera entre Ecuador y Colombia; los volcanes Chiles y Cerro Negro se sitúan en su interior. La cámara magmática que alimenta a este complejo volcánico constituye la fuente de calor [6, 7] del sistema geotérmico estudiado.

La mayoría de las aguas analizadas tienen temperaturas comprendidas entre los 32 y 52°C, su composición química e isotópica está resumida en la Tabla I. El 75% de las muestras son bicarbonáticas; el 12,5% son sulfatadas y corresponden a los manantiales más salinos y calientes, representando la interacción de aguas superficiales con gases volcánicos [8]. Las restantes muestras son cloruradas y magnésicas, que se ubican a varios kilómetros de distancia del área de interés. En la Figura 2 están las relaciones entre el ^{18}O y el Deuterio, donde se aprecia que tanto las aguas termales como las frías se encuentran sobre la recta meteórica y no se ve un enriquecimiento del ^{18}O , lo que no permite evidenciar fenómenos de intercambio agua-roca, de particular interés.

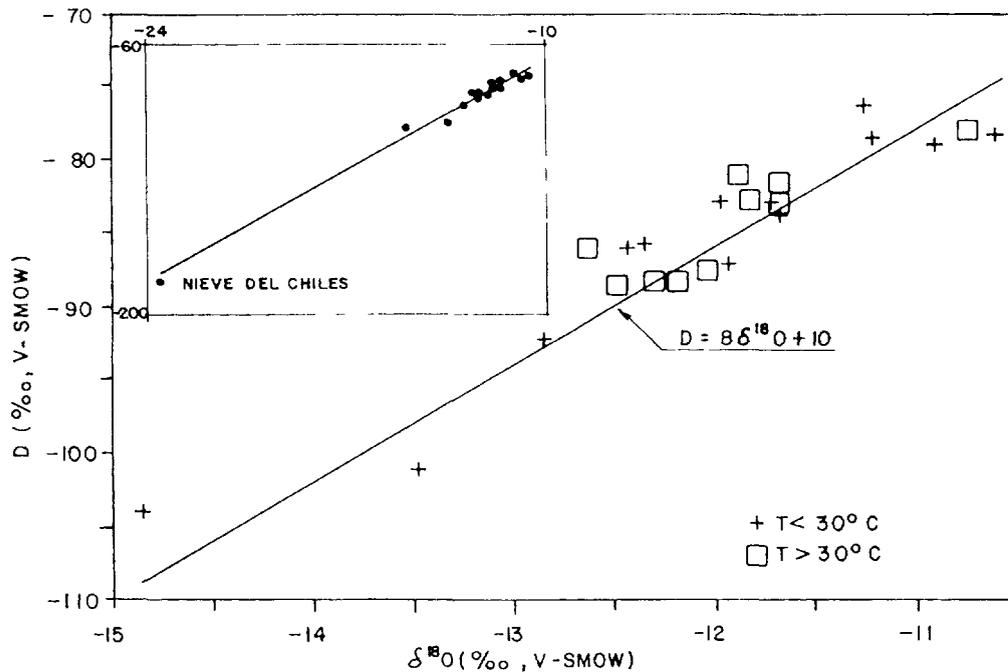


FIGURA 2. DIAGRAMA DE VARIACION $\delta^{18}O/\delta D$ DE TUFIÑO

El análisis de los datos permite concluir que todas las manifestaciones termales de Tufiño, incluso las más calientes, pertenecen a un acuífero superficial alimentado por aguas meteóricas de circulación bastante restringida, según lo indica el contenido de tritio. Estas aguas han sido modificadas química y térmicamente por el aporte de gases calientes de origen magmático (1C del orden de +2,7% hasta +5,6% PDB) [8] y, probablemente mínimas cantidades de vapor.

El único indicio geoquímico sobre la posible existencia de un sistema geotérmico de alta entalpía es constituido por la notoria presencia de gas, cuyos geotermómetros dan temperaturas del orden de los 230 °C.

3.2 CHACHIMBIRO

Se encuentra en un segmento de la Cordillera Occidental, que tiene una gran concentración de aparatos volcánicos y un volcanismo persiste desde el Plioceno. La característica básica, desde el punto de vista de la fuente de calor, es que los centros eruptivos del complejo volcánico de Chachimburo han sido alimentados por varias cámaras magmáticas evolucionadas [9].

El reservorio estaría localizado en rocas volcánicas a profundidades variables entre los 1000 y 2000m. Evidencias para su existencia están dadas por: Zonas de alteración hidrotermal; Fuentes termales, y; Emanaciones de gases. Las aguas termales son Cloruradas con temperaturas de 46°C, caudales de 70 l/min, salinidad de 7000mg/l. El contenido de SiO_2 varía entre 180 y 200ppm; además, tienen una gran cantidad de gas disuelto, fundamentalmente CO_2 [10].

La Figura 3 presenta las relaciones entre el 1D y el Deuterio; allí se evidencian dos grupos de aguas: Aguas frías de circulación somera, con la misma composición isotópica de las aguas meteóricas, y; Aguas termales que se desvían fuertemente de la recta de las precipitaciones.

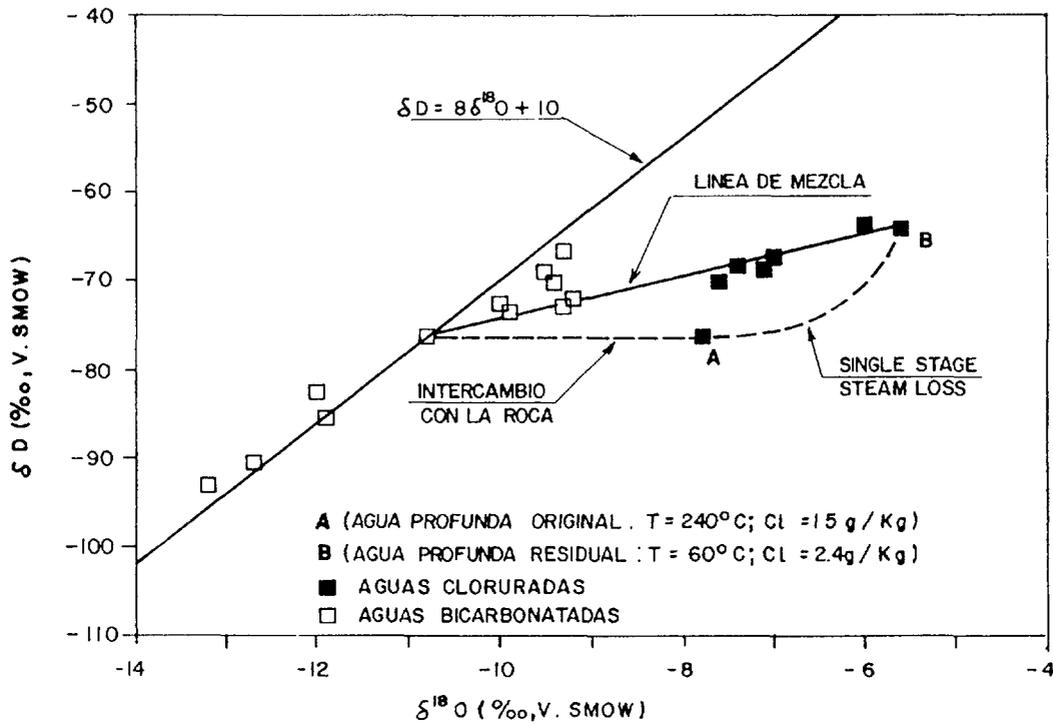


FIGURA 3. DIAGRAMA DE VARIACION $\delta^{18}\text{O}/\delta\text{D}$ DE CHACHIMBIRO

Las aguas termales muestran una evidente evolución química, desde aguas bicarbonatadas hasta aguas cloruradas, en donde el ^{18}O se incrementa de -11 a -6%.; los sólidos disueltos también se incrementan conforme aumentan los isótopos pesados en solución, sugiriendo un mecanismo de enriquecimiento de solutos, debido a una evaporación del agua meteórica original en condiciones termales anómalas, o también, por procesos de mezcla de aguas termales salinas con aguas frías.

La evaporación del agua desde una temperatura relativamente alta (p.e. 240°C), hasta condiciones superficiales (cerca de 60°C), ocasiona un incremento del ^{18}O en aproximadamente 2,2%. y, un enriquecimiento del cloro hasta el 30% de los valores originales. Para el caso de Chachimbiro, solamente este proceso no explica como, partiendo de aguas meteóricas que inicialmente tienen contenidos de ^{18}O y cloro más bajos que -10%. y 100mg/kg respectivamente, se observe que el ^{18}O alcanza un desplazamiento del 5%. y el contenido de cloro llegue a 2250mg/kg. Una explicación puede encontrarse considerando, adicionalmente, otro proceso en el cual las aguas meteóricas que circulan por rocas más oxigenadas del reservorio profundo, si la temperatura es más alta que 200°C [11, 12], incrementan su contenido de ^{18}O en aproximadamente el 3%. por intercambio con la roca. Estos dos procesos están esquemáticamente indicados en la Figura 3, donde, partiendo de un agua meteórica se llega a un agua geotérmica "A" que experimenta un proceso de evaporación en profundidad (single stage steam loss), hasta alcanzar un valor composicional como el de "B". Esta agua residual se mezcla con aguas subterráneas someras para dar el conjunto de aguas que se encuentran sobre la línea de mezcla.

En la Figura 4 se indican las variaciones del ^{18}O con la altura de emergencia, en las aguas de Chachimbiro y Cuicocha. Para Chachimbiro, es evidente la existencia de dos diferentes grupos: El primero, son aguas subterráneas someras de circulación restringida, por cuanto las áreas de infiltración están muy próximas a la zona de emergencia; El segundo grupo

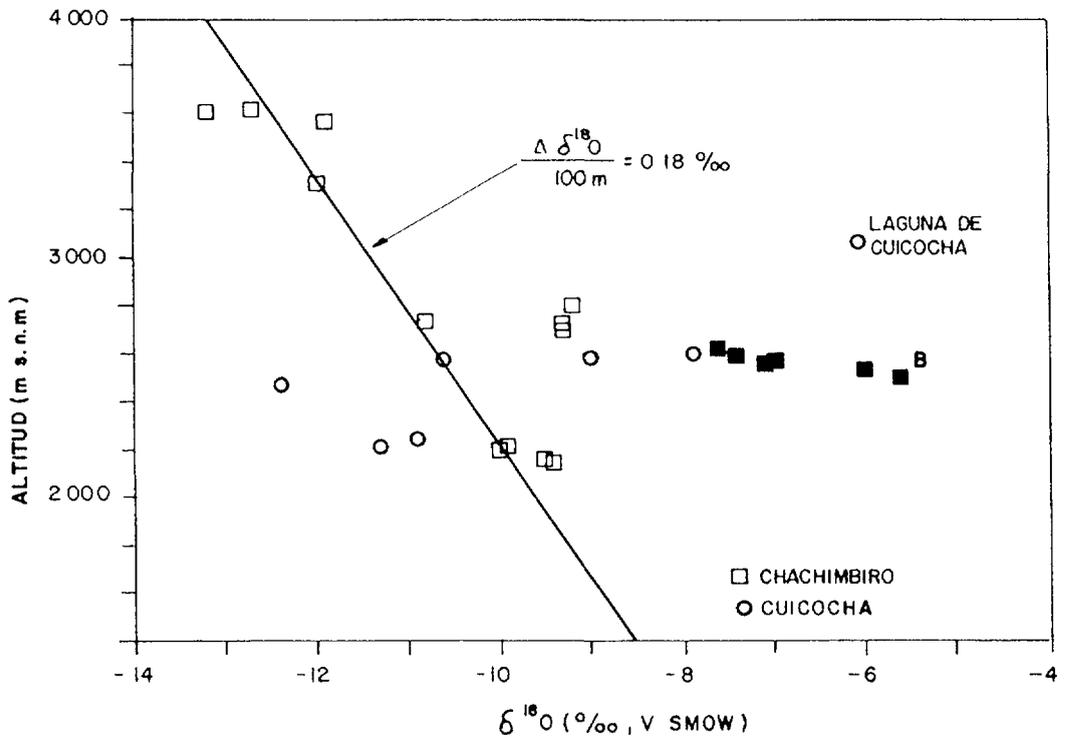


FIGURA 4. DIAGRAMA DE VARIACION $\delta^{18}O$ /ALTITUD DE CHACHIMBIRO Y CUICOCHA

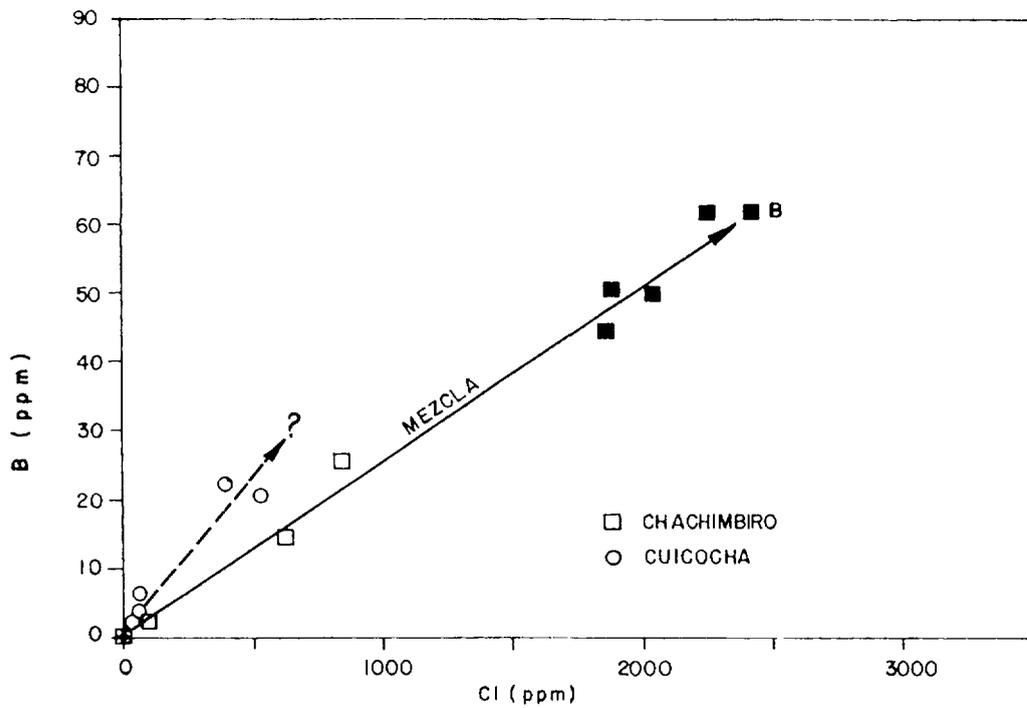


FIGURA 5. DIAGRAMA DE VARIACION Cl/B DE CHACHIMBIRO Y CUICOCHA

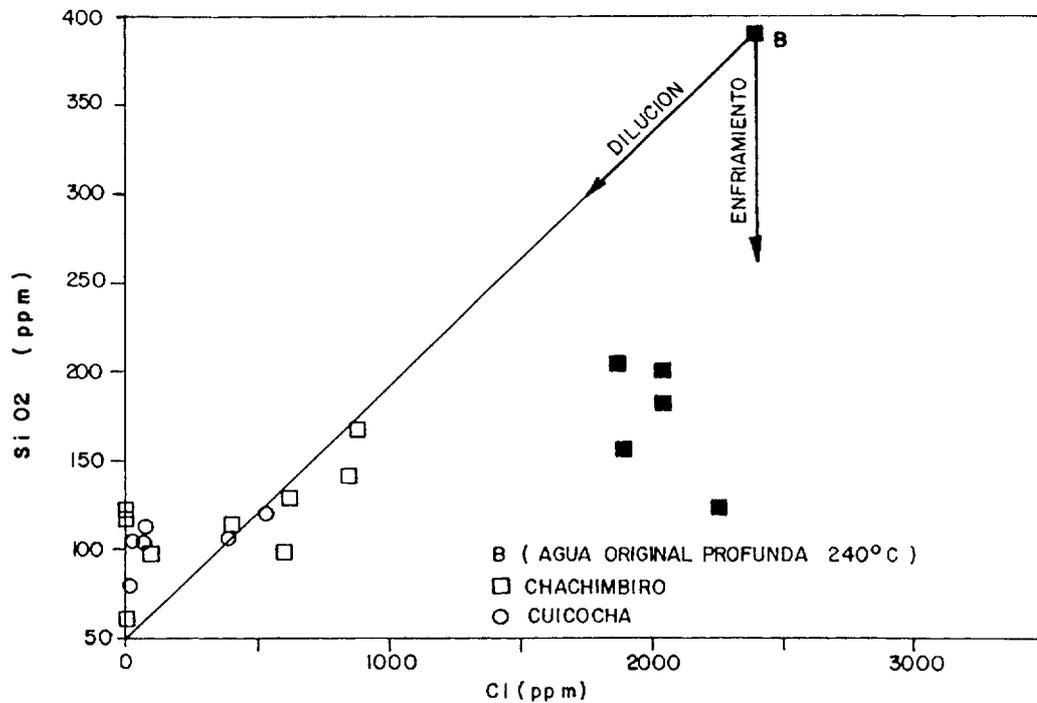


FIGURA 6. DIAGRAMA DE VARIACION CL/SI O₂ DE CHACHIMBIRO Y CUICOCHA

(muestras que se desvían a la derecha de la recta), refleja procesos de mezcla puestos en evidencia en la Figura 3, así como, en las Figuras 5 y 6, donde los contenidos de boro y silice son confrontados con el cloro.

En el diagrama Cl/SiO₂ existe una correlación positiva entre las aguas termales y frías de tipo bicarbonatado, con las cloruradas, que se desvían hacia la derecha de la recta de dilución, porque tienen altos contenidos de cloro con respecto al silice. Por el contrario, en el diagrama Cl/B, todas las muestras presentan una correlación lineal. Esta discrepancia puede ser explicada tomando en cuenta que tanto el boro como el cloro son parámetros "conservadores", y, la solubilidad del silice varía con el enfriamiento de las aguas termales emergentes [13]. Esto implica que, aparte de la mezcla, el enfriamiento también puede considerarse en las aguas cloruradas que emergen a la superficie. La simultánea existencia de los dos mecanismos, explica las composiciones presentadas en las Figuras 5 y 6, donde es interesante notar que las líneas de mezcla definen un componente profundo similar al obtenido del modelo isotópico presentado en la Figura 3.

3.3 CUICOCHA

Incluye los volcanes Cotacachi y Cuicocha cuyas características vulcanológicas permiten inferir una importante fuente de calor. El Cuicocha tuvo un estilo eruptivo explosivo [5, 14, 15] emitiendo flujos piroclásticos dacíticos [16]. La actividad se inició en el límite Pleistoceno-Holoceno, durante la cual se formó una caldera, hace 3100 años [17]. El Cotacachi es un estratovolcán andesítico de edad pleistocénica al cual se asocian varios domos dacíticos de edades holocénicas.

Las aguas que afloran en el sector son Bicarbonatadas, con temperaturas de 45°C, notándose que hacia las cercanías de la caldera existe un significativo aumento en el contenido de cloruros [10].

De la relación ^{18}O /Deuterio (Figura 7) se desprende que el desplazamiento es consecuencia de la mezcla entre el agua de la laguna de Cuicocha y las aguas termales de los alrededores. La línea de mezcla corta a la de las aguas meteóricas en la abscisa -12% , que puede representar el contenido de ^{18}O en las aguas de alimentación de la laguna. La pendiente de esta línea es igual a $4,8$ que es concordante con una evaporación superficial a baja temperatura [18]. Si este es el caso, un enriquecimiento del 6% en el ^{18}O ocurre en las aguas del lago hasta alcanzar condiciones estacionarias. Sin embargo, este fuerte enriquecimiento no está acompañado de un sensible incremento en la salinidad total de las aguas evaporadas. En efecto, las aguas del lago presentan un muy bajo contenido de sal ($420 \mu\text{Siemens}$), donde el ión dominante es el bicarbonato. Esto sugiere que las aguas meteóricas que lo alimentan, son esencialmente constituidas por nieve fundida, la cual está presente en el vecino volcán Cotacachi. En realidad, la mezcla del agua de la laguna con las aguas termales ocasionaría una desigual dilución de las soluciones termales, porque ocurre solamente a lo largo de fracturas y fallas. Por esta causa, las dos muestras ubicadas en la línea de mezcla (Figura 7) contienen cada una el 70% y el 30% del agua del lago y, los sólidos disueltos totales son de 3800 y 500mg/kg respectivamente, sugiriendo con esto, que estas dos aguas termales representan dos reservorios distintos.

En la Figura 4, se aprecia a un grupo de aguas que se desplaza a la izquierda de la recta, esto se interpreta como acuíferos con larga circulación, porque las áreas de alimentación están a alturas mucho más elevadas. Particularmente el lago de Cuicocha, ubicado a mayor altura que las fuentes termales.

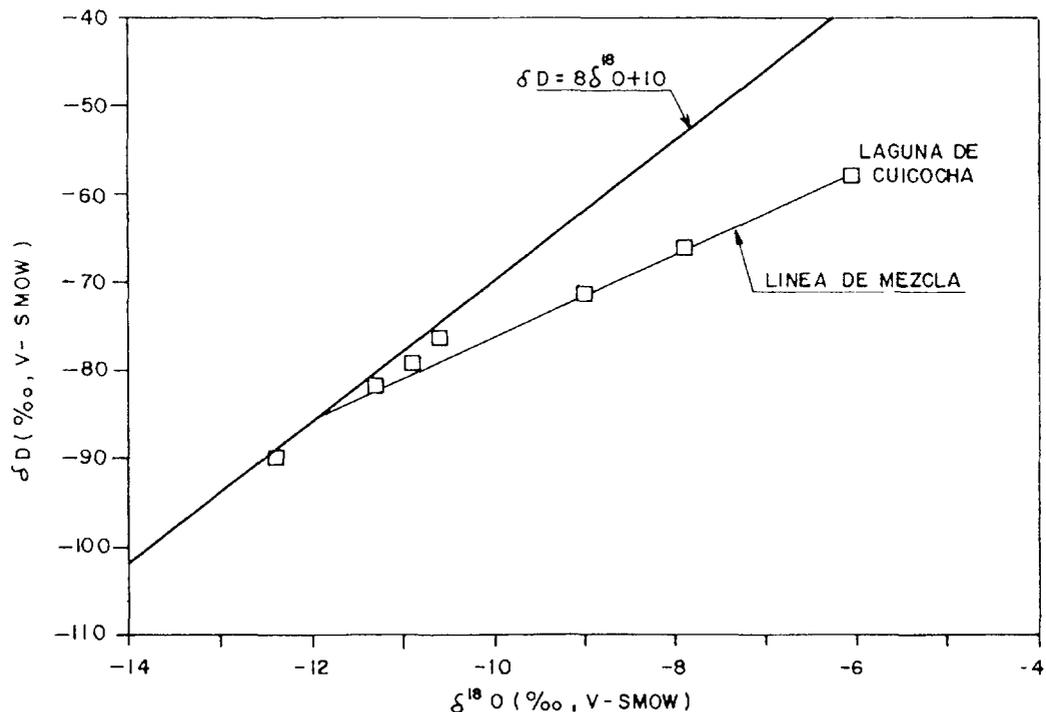


FIGURA 7. DIAGRAMA DE VARIACION $\delta^{18}\text{O}/\delta\text{D}$ DE CUICOCHA

3.4 PAPALLACTA

Esta área tiene manantiales de composición clorurada sódica con un importante componente sulfato cálcico, una elevada salinidad [19] y temperaturas de 66°C. Estas aguas afloran en una zona de fallamiento, en el contacto entre el basamento metamórfico de la Cordillera y el volcánico terciario. Una compleja situación tectónica y volcánica, dificulta establecer hipótesis sobre el origen de la fuente de calor, a nivel de reconocimiento.

Si bien los datos disponibles son pocos, lo que condiciona fuertemente la interpretación, desde el punto de vista térmico la situación parece interesante. La Figura 8 presenta la relación ^{18}O /Deuterio de las tres vertientes muestreadas; una de ellas está enriquecida en ^{18}O con respecto a las otras dos, que se ubican en la línea de las aguas meteóricas. Por lo tanto, suponemos que un posible mecanismo de intercambio con las rocas pudo tener lugar; además, las características geomorfológicas del área y la relación ^{18}O /altura indican que esta agua tiene una zona de alimentación 600m más elevada que las otras dos. Todo esto, permite asumir que esta agua experimentó condiciones de alta temperatura en profundidad, lo que parece confirmarse al aplicar los geotermómetros químicos reportados, más adelante.

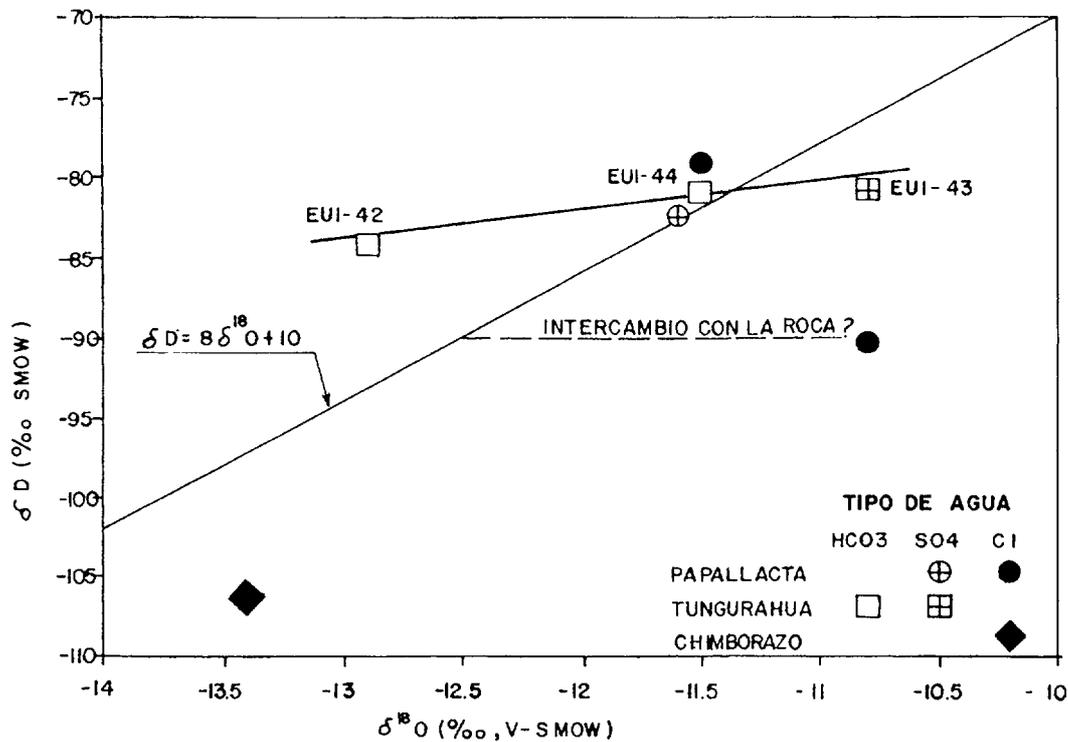


FIGURA 8. DIAGRAMA DE VARIACION $\delta^{18}\text{O}$ / δD DE LAS AREAS DE PAPALLACTA , TUNGURAHUA Y CHIMBORAZO

3.5 CHALUPAS

Se trata de una caldera (16 x 14)km, formada por el colapso del estratovolcán Chalupas, luego de que éste emitió por lo menos 100 km cúbicos [20] de materiales riolíticos [16]; posteriormente, el volcanismo se reactivó en el interior de la caldera. Las particulares características

del sistema de alimentación magmática de este complejo volcánico, activo desde hace un millón de años, son buenas evidencias de la existencia de una fuente de calor.

En la Figura 9, las muestras relativas al área de Chalupas, caen sobre la recta de las aguas meteóricas en un amplio intervalo de composición. Esto permite suponer la existencia de una fuerte circulación superficial sin encontrarse condiciones anómalas de temperatura, esto confirma el modelo geovolcanológico de INECEL [20] en el cual se indica que la caldera está rellena por materiales impermeables (piroclastos y sedimentos lagunares) que constituyen un efectivo sello al sistema geotérmico. Las variaciones en el contenido isotópico corresponden a diversas cotas de infiltración, situadas entre los 3500 y 4200m de altura.

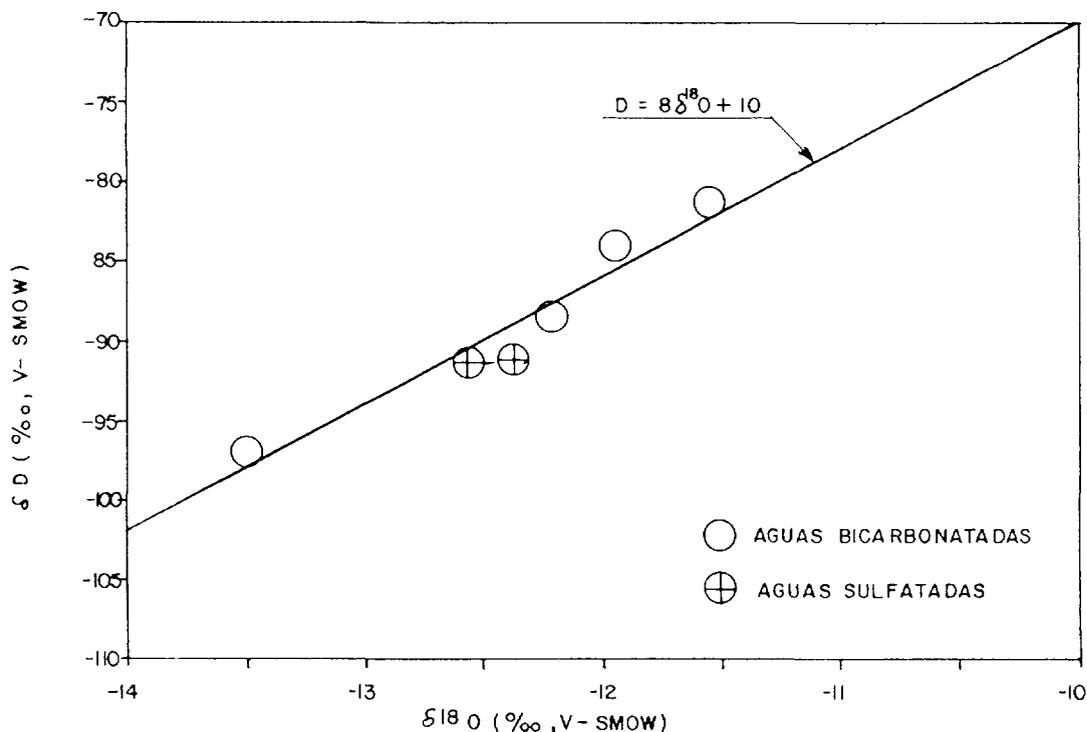


FIGURA 9 DIAGRAMA DE VARIACION $\delta^{18}O/\delta D$ EN CHALUPAS

3.6 TUNGURAHUA

En los flancos del activo volcán Tungurahua, existen abundantes manifestaciones de aguas bicarbonatadas ácidas y sulfatadas, con temperaturas hasta de 53°C [21]. Tres muestras fueron analizadas (EUI-42, 43 y 44 de la Tabla I), la correlación entre el ^{18}O y el Deuterio es una recta de pendiente +1,8 (Figura 8) sugiriéndonos que las aguas pudieron ser sometidas a procesos de evaporación-condensación a una temperatura de aproximadamente 200°C [18].

La EUI-44 es agua subterránea local que durante su descenso por el interior del cono, interacciona con gases volcánicos calientes (SO_2 , H_2S y CO_2), dando como resultado un fuerte incremento de HCO_3 y SQ en la solución y, un simultáneo incremento de la temperatura del líquido hasta alcanzar probablemente los 200°C. Bajo estas condiciones, se produce la evaporación parcial de la solución, formándose vapor que se condensa en la parte alta del volcán, originando un acuífero termal con una composición química e

TABLA I. RESULTADOS DE LOS ANALISIS QUIMICOS E ISOTOPICOS DE LAS AGUAS

CODIGO MUESTRA	FECHA	ALTURA (m)	T (°C)	pH	HCO3 (mg/l)	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	Na (mg/l)	K (mg/l)	Cl (mg/l)	SO4 (mg/l)	B (mg/l)	NH4 (mg/l)	SiO2 (mg/l)	δ18O	δD	TRITIO (TU)
T U F I Ñ O																	
ECU 100	860524	3850	41.2	3.1		328.0	64.0	78.0	18.0	320.0	1300.0			228.0	-10.73	-78.0	5.5
ECU 102	860526	3320	35.0	6.9	230.0	34.2	12.1	86.6	15.0	48.0	43.0		0.4	136.0	-11.67	-82.9	0.7
ECU 106	860526	3550	37.5	6.3	590.0	89.0	50.8	141.0	27.0	26.0	270.0		0.4	150.8	-12.48	-88.7	0.8
ECU 112	860523	3530	35.0	5.9	350.0	100.0	70.6	149.0	34.0	110.0	550.0			159.0	-12.03	-87.6	
ECU 114	860523	3280	25.5	6.6	290.0	37.7	21.0	85.2	16.0	68.0	78.0		0.1	109.0	-11.71	-83.0	1.2
ECU 115	860529	3260	40.1	6.2	670.0	104.0	70.7	134.8	3.1	74.0	2100.0		0.2	157.0	-12.62	-86.1	0.5
ECU 119	860530	2880	22.5	6.3	240.0	21.9	16.8	39.1	11.0	15.0	24.0			99.3	-11.96	-82.9	2.4
ECU 122	860522	2860	22.5	6.2	220.0	21.6	19.4	36.1	10.0	12.0	5.8			97.8	-11.67	-83.9	
ECU 123	860522	2910	32.8	6.3	1100.0	86.8	96.3	190.0	55.0	110.0	33.0			142.0	-12.28	-88.4	
ECU 125	860530	2930	32.0	6.0	700.0	68.8	65.7	71.3	21.0	31.0	22.0		0.7	138.0	-11.81	-82.9	1.0
ECU 129	860527	3350	34.3	6.5	320.0	33.7	19.8	61.5	15.0	25.0	24.0		0.4	149.0	-11.67	-81.9	0.5
ECU 142	860525	2890	40.8	6.4	1700.0	113.0	143.0	387.0	85.0	240.0	21.0			162.0	-12.20	-88.3	0.9
ECU 200	860522	2930	16.2												-11.93	-87.2	
ECU 203	860523	3280	16.3												-10.59	-78.3	
ECU 204	860523	3550	10.9												-11.25	-76.4	10.5
ECU 205	860525	2860	29.7	6.1	960.0	74.2	80.5	151.0	43.0	77.0	27.0			129.0	-12.35	-85.9	1.6
ECU 206	860526	3340	13.7												-13.47	-101.1	
ECU 207	860526	3160	24.0	6.5	330.0	21.4	9.4	29.6	6.2	15.0	16.0			105.0	-10.90	-79.0	
ECU 208	860527	3620	10.7												-12.85	-92.3	
ECU 209	860529	3970	7.3												-12.43	-86.0	5.8
ECU 216	860529	3630	7.0												-14.85	-104.1	
ECU 217	860530	2930	32.0	6.4	800.0	75.8	70.6	86.0	24.0	37.0	24.0			144.0	-11.88	-81.2	
ECU 218	860531	2750	27.5	6.6	1200.0	118.0	113.0	110.0	30.0	64.0	2.8			135.0	-11.21	-78.6	0.3
NIEVE	860529	4200	0.0												-23.55	-181.7	
C H A C H I M B I R O																	
EUI 01	871204	2740	41.6	7.1	1252.9	9.2	123.0	719.0	64.0	646.0	10.7	25.6	0.1	141.0	-9.23	-72.1	0.3
EUI 01	900711	2740	41.0	6.7	1276.0	248.0	145.0	665.0	63.2	879.0	9.9			168.0	-9.30	-72.9	
EUI 02	871205	2560	46.2	6.7	718.1	94.8	47.2	1350.0	136.0	2040.0	30	49.7	7.1	182.0	-7.11	-69.0	0.9
EUI 03	871206	2590	45.8	7.5	608.3	84.9	44.4	1230.0	135.0	1860.0	32	44.3	3.0	204.0	7.38	-68.5	0.4
EUI 03a	900710	2618	58.1	6.3	661.0	76.7	47.7	1280.0	155.0	2040.0	30.9			200.0	-7.60	-70.2	
EUI 04	871207	2530	31.7	6.8	1234.6	86.0	82.3	1660.0	67.0	2250.0	10.1	61.4	0.1	123.0	-6.03	-64.0	0.3

TABLA I (continuación). RESULTADOS DE LOS ANALISIS QUIMICOS E ISOTOPICOS DE LAS AGUAS

CODIGO MUESTRA	FECHA	ALTURA (m)	T (°C)	pH	HCO ₃ (mg/l)	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	Na (mg/l)	K (mg/l)	Cl (mg/l)	SO ₄ (mg/l)	B (mg/l)	NH ₄ (mg/l)	SiO ₂ (mg/l)	δ ¹⁸ O	δD	TRITIO (TU)
EUI 05	871208	2200	23.1	7.2	308.8	47.2	37.3	104.0	10.9	94.5	4.5	2.2	0.1	97.1	-9.87	-73.8	0.3
EUI 06	871208	2155	30.7	7.3	1018.3	69.5	135.0	387.0	34.7	618.0	11.5	14.7	0.1	129.0	-9.42	-70.3	0.4
EUI 06	900711	2155	30.6	6.8	1013.0	162.0	149.0	351.0	28.0	597.0	9.9			98.0	-9.50	-69.1	
EUI 07	871207	2570	40.4	7.2	1089.8	41.0	63.9	1420.0	62.5	1890.0	11.7	50.4	0.1	158.0	-6.98	-67.5	0.0
EUI 10	871209	2540	13.8	6.9											-9.09	-67.9	1.0
EUI 11	871209	3570	9.1	7.0	36.6	2.8	0.9	6.0	2.7	0.8	1.5	0.0	0.1	41.2	-11.93	-85.6	3.3
EUI 12	871210	2730	21.6	6.8	250.1	40.4	15.4	33.2	6.4	1.6	1.5	0.1	0.1	121.0	-10.82	-78.2	1.1
EUI 13	871210	2700	10.0	7.0										8.8	-9.25	-66.8	2.8
EUI 31	900711	2190	28.8	6.4	770.8	61.6	40.9	326.0	13.4	404.0	2.4			114.0	-10.00	-72.7	
EUI 32	900712	3618	7.0		138.8	18.8	7.4	9.3	2.7	0.2	0.6			61.0	-12.70	-90.5	
EUI 33	900712	3610	7.0		92.8	13.1	6.3	5.9	2.1	0.2	0.9			48.0	-13.20	-93.1	
EUI 34	900713	3305	17.0		140.8	21.3	6.4	14.6	2.9	0.2	11.1			117.0	-12.00	-82.5	
C U I C O C H A																	
EUI 08	871208	2570	25.7	7.2	970.0	11.3	150.0	140.0	14.4	77.1	6.1	3.4	0.4	112.0	-10.58	-78.3	0.0
EUI 09	871208	2800	25.5	7.3	2156.1	3.0	205.0	764.0	29.6	529.0	41.8	20.8	0.1	120.0	-7.91	-68.1	0.2
EUI 14	871210	2240	18.9	7.0	227.2	30.3	17.8	32.1	1.7	5.5	3.0	0.1	0.1	79.1	-10.89	-79.2	0.4
EUI 15	871211	3084	14.0							67.0		6.0		38.0	-6.07	-57.9	2.1
EUI 16	871211	2480	19.2	6.8	742.7	47.5	125.0	104.0	7.0	67.3	41.2	3.6	0.1	103.0	-12.45	-90.0	0.0
EUI 17	871212	2200	22.5	6.4	1872.4	4.3	287.0	367.0	20.4	396.0	41.7	22.7	0.1	106.0	-11.32	-81.8	0.0
EUI 18	871212	2580	19.8	6.7	265.1	47.3	29.4	38.7	5.0	22.1	16.5	1.6	0.1	105.0	-8.97	-71.4	0.4
P A P A L L A C T A																	
EUI 35	900714	3280	48.2	6.8	94.1	215.0	2.5	332.0	5.7	514.0	369.0	45.5			-11.50	-79.2	
EUI 37	900714	3510	66.7	6.8	1425.6	337.0	54.4	1350.0	80.2	619.0	440.0	80.0			-11.60	-82.4	
EUI 38	900715	2750	41.2	7.0	409.2	277.0	7.8	1270.0	54.2	1980.0	282.0	92.8			-10.80	-90.4	
C H A L U P A S																	
EUI 19	871215	3520	25.0	6.1	937.0	28.8	74.6	245.0	14.1	87.6	0.4	2.1	0.1	108.0	-11.55	-81.3	0.6
EUI 20	871217	3740	35.1	6.8	857.7	9.6	16.0	312.0	38.5	39.1	4.6	1.5	0.1	153.0	-13.50	-97.2	0.1
EUI 21	871218	3500	18.0	6.6	450.2	82.2	65.3	64.2	10.2	61.5	4.0	1.1	0.1	99.7	-11.95	-84.2	0.2

TABLA I (continuación). RESULTADOS DE LOS ANALISIS QUIMICOS E ISOTOPICOS DE LAS AGUAS

CODIGO MUESTRA	ALTURA (m)	T (°C)	pH	HCO ₃ (mg/l)	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	Na (mg/l)	K (mg/l)	Cl (mg/l)	SO ₄ (mg/l)	B (mg/l)	NH ₄ (mg/l)	S ₂ O ₃ (mg/l)	δ ¹⁸ O	δD	TRITIO (TU)	
EUI 22	871218	3580	16.1	6.8	345.3	42.1	29.7	28.8	6.2	14.5	3.8	0.6	0.1	62.3	-12.22	-88.6	0.2
EUI 23	871219	3900	18.8	7.2	569.7	121.0	219.0	333.0	20.3	382.0	790.0	1.6	3.0	61.4	-12.37	-91.2	0.0
EUI 24	871219	3900		7.0										-12.56	-91.4	0.6	
T U N G U R A H U A																	
EUI 42	900719	2840	36.4	6.8	1525.8	171.0	240.0	217.0	27.9	44.8	328.0	154.0		154.0	-12.90	-84.2	
EUI 43	900719	2015	44.3	6.8	627.9	376.0	851.0	531.0	77.6	658.0	660.0	162.0		162.0	-10.80	-80.9	
EUI 44	900719	1910	52.9	7.0	1445.2	212.0	450.0	525.0	74.6	450.0	450.0	190.0		190.0	-11.50	-81.0	
C H I M B O R A Z O																	
EUI 46	900720	3660	47.5	7.5	37.9	320.0	0.5	682.0	7.5	1340.0	252.0	48.2		48.2	-13.40	-106.3	
C U E N C A																	
EUI 25	880210	2715	73.0	7.4	782.4	184.0	23.4	750.0	58.5	874.0	233.0	14.2	0.1	66.4	-11.16	-81.0	0.0
EUI 25	900717	2715	73.3	7.2	574.4	206.0	22.9	730.0	61.4	884.0	215.0			61.0			
EUI 25a	8811-	2720	72.5											-11.30	-82.2		
	8811-	2720	68.0											-11.20	-81.2		
	8811-	2720	62.0											-11.30	-80.9		
	8811-	2720	65.0											-11.10	-80.0		
	8811-	2720	65.0											-11.20	-80.1		
EUI 26	880211	2720	56.0	6.6	890.3	152.0	24.0	743.0	59.0	861.0	227.0	13.3	0.5	58.8	-11.27	-81.2	0.2
EUI 26	8811-	2720	57.0											-11.30	-80.2		
	8811-	2720	48.0											-11.30	-79.7		
	8811-	2720	57.0											-11.40	-80.6		
EUI 27	880212	3000	17.2	7.5										-9.73	-72.7	0.1	
EUI 28	880212	2560	17.6	7.6	111.8	16.1	5.6	21.2	3.6	0.8	2.7	0.0	0.1	88.5	-10.11	-74.8	0.0
EUI 29	880213	3180	43.5	7.7	74.4	2.4	0.3	55.0	1.4	12.6	26.6	0.3	0.1	51.7	-11.42	-79.8	0.1
EUI 30	880214	2720	22.3	7.0	74.4	10.5	4.3	11.2	3.4	1.0	0.9	0.0	0.1	68.0	-10.57	-75.8	0.4
EUI 39	900717	2763	17.0	7.0	1758.3	502.0	38.8	2460.0	182.0	3160.0	54.0			63.0	-11.70	-79.8	

isotópica similar a la de la muestra EUI-42. Por otra parte, las aguas residuales de la evaporación circulan hacia la base del cono, originando aguas termales similares a la muestra EUI-43, que tiene al sulfato como ión dominante en la solución, y presenta además, un alta concentración de los isótopos pesados.

3.7 CHIMBORAZO

Es el estratovolcán más alto del Ecuador, su actividad se inicio' en el Pleistoceno y fue practicamente continua hasta el Holoceno. La interpretación petrológica de los productos emitidos en sus tres etapas evolutivas, sugiere la presencia de una cámara magmática en donde el magma basáltico-andesítico de las etapas iniciales, evoluciono' hasta un producto final de composición dacítica- riolítica [16]. Durante su evolución, el magma transfirio' calor provocando una anomalía térmica, cuya primera evidencia en superficie son fuentes termales con temperaturas de 46°C.

La única muestra que ha sido analizada puede ser considerada como agua subterránea cuyo origen esta' en los deshielos del Volcán Chimborazo, a alturas superiores a los 4500m. La desviación que se observa en la Figura 8, respecto a la recta de las aguas meteóricas no encuentra, en este momento, una explicación satisfactoria debido a la falta de otros datos analíticos.

3.8 CUENCA

Esta área es conocida por la existencia de fuentes termales con una elevadísima salinidad, alta conductividad y caudales del orden de los 20 l/s [10, 19]. Estas aguas tienen las mayores temperaturas (73,3°C) registradas en el país y, precipitan travertinos que son explotados como roca ornamental. Esta zona termal se encuentra en una cuenca sedimentaria cretácica y los materiales volcánicos más próximos son de edad terciaria.

Las manifestaciones aflorantes son de dos clases: Aguas cloruradas con temperaturas mayores que 48°C, concentradas en un área de aproximadamente un kilómetro cuadrado y que son aprovechadas como balnearios (Baños de Cuenca), y; Aguas bicarbonatadas frias (17 a 22°C), diseminadas en una zona relativamente amplia, varios kilómetros alrededor de los balnearios. En esta zona marginal existe un manantial frio de tipo clorurado que tiene el menor contenido de ¹⁸O y una elevada salinidad (TDS = 8,2g/kg).

Las aguas termales tienen una zona de alimentación situada aproximadamente a una elevación de 3200m, esto es, 500m sobre la altura de los balnearios. En el área de Baños se muestrearon 11 vertientes cuya temperatura de emergencia varia entre 48 y 73,3°C. No obstante tal diferencia térmica, la composición isotópica de los diversos manantiales es muy homogénea (Figuras 10 y 11), situándose sobre o muy próximos a la línea de las precipitaciones; al mismo tiempo, el contenido de ión cloruro se mantiene constante. Todo esto permite suponer que el agua profunda alcanzo' condiciones de equilibrio químico con las rocas de un reservorio somero, en el tope de la potente cuenca sedimentaria.

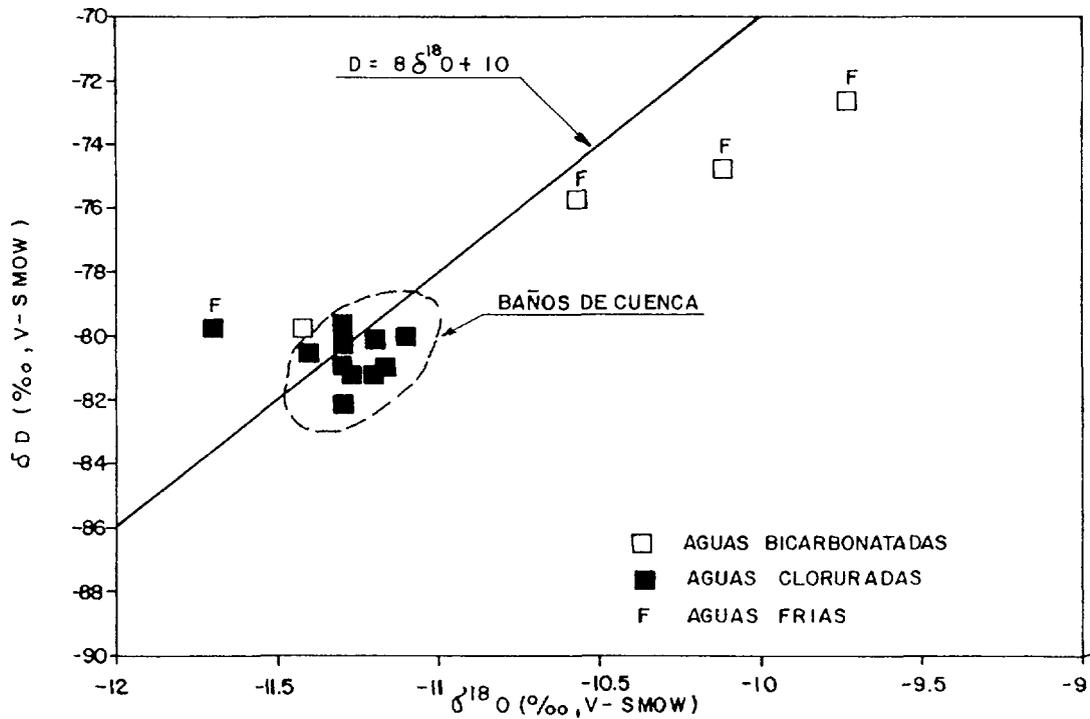


FIGURA 10. DIAGRAMA DE VARIACION $\delta^{18}O / \delta D$ EN CUENCA

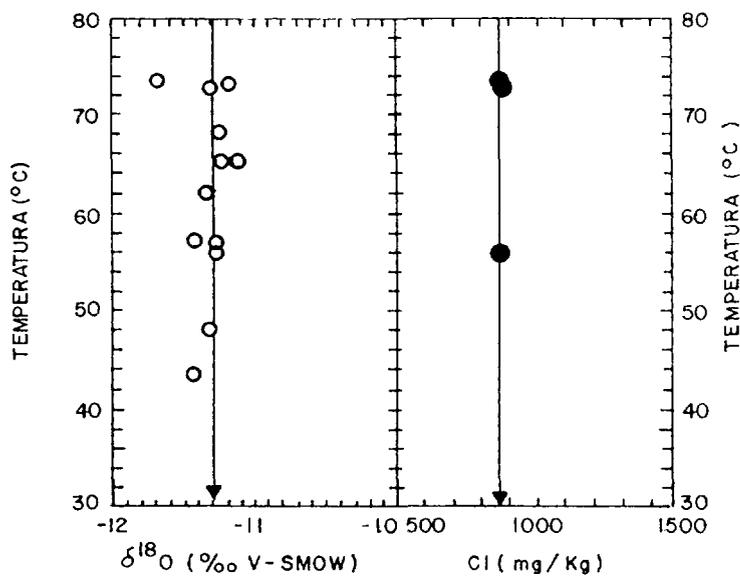


FIGURA 11. DIAGRAMA DE VARIACION $\delta^{18}O$ Y Cl CON LA TEMPERATURA EN CUENCA

4 EVALUACIONES GEOTERMOMETRICAS

La Figura 12 presenta un diagrama triangular donde se relacionan las concentraciones relativas de K, Na y Mg en todas las aguas analizadas. Este diagrama ha sido modificado de un original propuesto por Giggenbach [22], con el fin de ampliar el área correspondiente a la esquina del magnesio, en la cual generalmente están localizadas las aguas inmaduras. Muchas de las

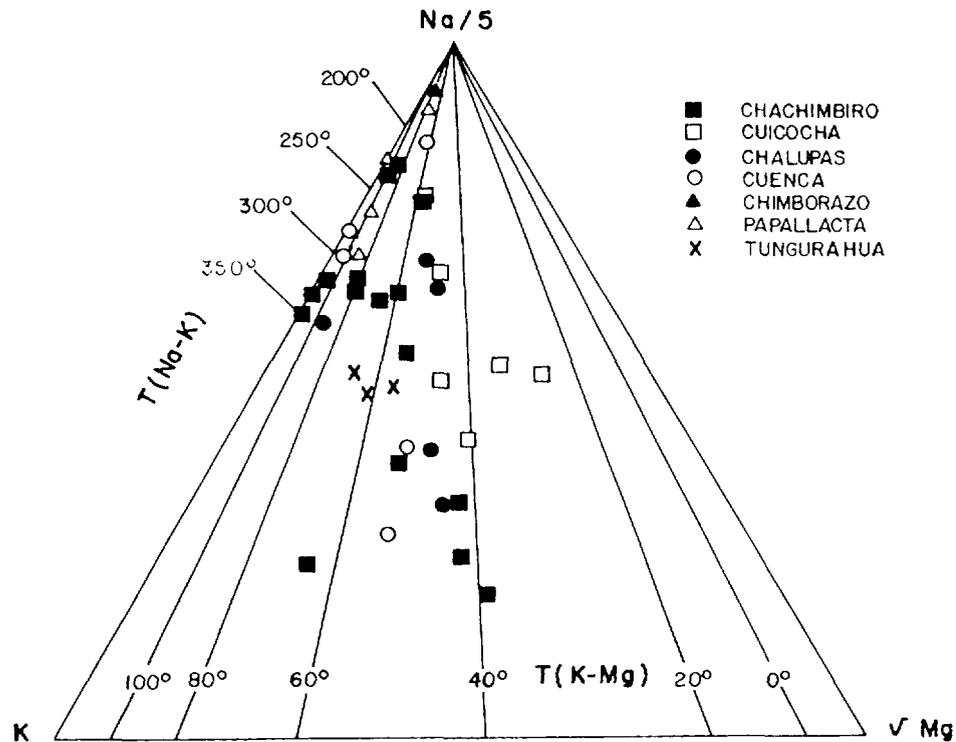


FIGURA 12. CONCENTRACIONES RELATIVAS Na, K, Mg (mg / kg) DE TODAS LAS AGUAS ESTUDIADAS

muestras de agua caen entre las dos líneas que describen la temperatura K/Mg en el rango de 40 a 60°C, indicando con esto que este par iónico es incapaz de reflejar las condiciones termales profundas. Por otra parte, la relación Na/K parece más útil para evaluar las temperaturas profundas, pero esta' restringida a pocas muestras. Realmente, la Figura 12 indica que muchas de las muestras tienen temperaturas Na/K mas altas que 250°C pero, no parecen ser reales si se toma en cuenta las características isotópicas ya discutidas.

Solamente pocas muestras de Chachimbiro, Papallacta, Chimborazo y Cuenca parecen admitir la aplicación del geotermómetro Na/K, ellas son aguas cloruradas y parecen ser maduras o parcialmente equilibradas con rocas de los acuíferos (según la definición dada por Giggenbach [22]). Consecuentemente, temperaturas de 240, 200, 100 y 200°C pueden ser obtenidas, respectivamente, en las áreas indicadas.

En cuanto se refiere a Tufiño, las manifestaciones termales, incluso las más calientes, son aguas superficiales modificadas por el aporte de gases calientes, no existiendo una evidencia segura de la contribución de un componente líquido profundo. La evaluación de la termalidad, por consiguiente, es posible únicamente con ayuda de la geotermometría de gases. Las temperaturas obtenidas de esta manera, dan un máximo de 220 a 230°C [23, 24].

5 CONCLUSIONES

Los indicadores químicos e isotópicos presentados, ratifican el interés geotérmico de las áreas de Tufiño, Chachimbiro y Cuenca. Además, constituyen argumentos positivos que justifican la iniciación de

investigaciones geocientíficas detalladas en Papallacta y Chimborazo. Con respecto a Chalupas, los métodos químicos e isotópicos no han sido de mucha utilidad, debido a las características de las aguas muestreadas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a INECEL y al IIRG por las facilidades para elaborar el presente trabajo, elaborado en el marco del "Programa Coordinado de Investigaciones para América Latina, sobre la Aplicación de Técnicas Geoquímicas e Isotópicas en la Exploración Geotérmica", financiado por el Gobierno de Italia. Especial reconocimiento a la OIEA y, particularmente, al Dr. Roberto Gonfiantini quien brindó su total apoyo a las gestiones técnicas del Contrato de Investigación 3991/IG mediante el cual se realizaron las investigaciones de las áreas ecuatorianas.

REFERENCIAS

- [1] FEININGER, T. "La Geología Histórica del Cretácico y Paleógeno de la Costa Ecuatoriana" Politécnica, Monografía de Geología. Vol. V, No. 2, (1980) 7-45 p.
- [2] FEININGER, T. "El Basamento Metamórfico del Ecuador" Politécnica, Monografía de Geología 3, Vol. VIII, No. 2, (1983) 37-48p.
- [3] ALMEIDA, E. "El Riesgo Volcánico en el Ecuador Continental" Memorias Segundas Jornadas Nacionales de Geología, Minas y Petróleo. Universidad Central del Ecuador, (1988), 57-60 p.
- [4] HALL, M., CALLE, J. "Control Geocronológico de los Principales Eventos Tectónico-Magmáticos del Ecuador" Politécnica, Monografía de Geología 2, Vol. VI, No. 4, (1981), 7-36 p.
- [5] BARBERI, F., COLTELLI, M., FERRARA, G., INNOCENTI, F., NAVARRO, M., SANTACROCE, R. "Plio-Quaternary Volcanism in Ecuador" Geol. Magm. 125 (1), (1988), 1-14 p.
- [6] NAVARRO, J., ALMEIDA, E., AYALA, J. "Geovolcanología del Norte del Ecuador y, en Particular, del Área de Tufiño" OLADE-INECEL, Inf. Int. (1982), 98 p.
- [7] GEOTERMICA ITALIANA. "Aprovechamiento de los Recursos Geotérmicos de la Zona de Tufiño, Ecuador Septentrional, Informe Geovolcanológico" OLADE-INECEL, Inf. Int., Quito. (1982), 110 p.
- [8] ENEL, Unita' Nazionale Geotermica, "Indagine Isotopica nella Regione di Tufiño-Cerro Negro, Repubblica dell'Ecuador, Sintesi dei Dati Raccolti ed Interpretazione Preliminare" IAEA-INECEL, Pisa, Diciembre 1986.
- [9] ALMEIDA, E. "Alternativas para el Desarrollo Geotermoeléctrico en la República del Ecuador" Inf. Int. INECEL, Proyecto Geotérmico. Quito, (1990), 49 p.
- [10] SANDOVAL, G. "Investigación Geoquímica e Isotópica en la Región de Cuenca-Chalupas-Chachimero en la República del Ecuador, Síntesis de Datos Obtenidos e Interpretación Preliminar" INECEL-OIEA, Inf. Int., Quito, (1988), 8 p.

- [11] PANICHI, C., GONFIANTINI, R. "Geothermal Waters" in: Stable Isotope Hydrology: Deuterium and Oxygen-18 in the Water Cycle. IAEA, Technical Reports No. 210, Vienna, (1981).
- [12] GIGGENBACH, W., GONFIANTINI, R., PANICHI, C. "Geothermal Systems" in: Guidebook on Nuclear Techniques in Hydrology. IAEA, Technical Reports No. 91, Vienna, (1983).
- [13] TRUESDELL, A., FOURNIER, R. "Procedures for Estimating the Temperature of Hot Water Component in a Mixed Water Using a Plot of Dissolved Silica Versus Entalphy" J. Res., U. S. Geol. Survey, V. 5, (1977), p. 49.
- [14] HALL, M. "El Volcanismo en el Ecuador" Inst. Pan. Geografia e Historia. I.G.M., Quito, (1977), 120 p.
- [15] CALVACHE, M., BARREIRO, J., ORTIZ, S., CORONEL, V., CREUSOT, A., GONZALEZ, V., JARAMILLO, S. "Estudio Geovolcanológico del Area de Cuicocha-Cotacachi" Informe Final del Primer Curso Latinoamericano de Geovolcanología Aplicada a la Exploración Geotérmica, Quito, OLADE, (1983), 50 p.
- [16] COLTELLI, M. "Il Vulcanismo delle Ande Ecuadoriane" Tesis, Corso di Laurea in Scienze Geologiche, Universita' Degli Studi di Pisa, (1984).
- [17] von HILLEBRANDT, Ch. "Estudio Geovolcanológico del Complejo Volcánico Cuicocha-Cotacachi y sus Aplicaciones, Provincia de Imbabura" Tesis, Escuela Politécnica Nacional, Quito. (1989).
- [18] TRUESDELL, A., NATHENSON, M. "The Effects of Subsurface Boiling and Dilution on the Isotopic Composition of Yellowstone Thermal Waters" J. Geoph. Res. V. 82, No. 26, (1977), p. 3694.
- [19] AQUATER. "Proyecto de Investigación Geotérmica de la República del Ecuador, Estudio de Reconocimiento" Informe preparado para OLADE e INECEL, San Lorenzo in Campo, Italia, (1980).
- [20] INECEL. "Estudio de Exploración de los Recursos Geotérmicos en Chalupas, Primera Fase Prefactibilidad". Informe interno preparado por el Proyecto Geotérmico, (1983).
- [21] INECEL. "Estudio Geológico de las Fuentes Termales de Palictahua, Provincia de Chimborazo". Informe interno preparado por el Proyecto Geotérmico, (1984).
- [22] GIGGENBACH, R. "Geothermal Solute Equilibria. Derivation of Na-K-Mg-Ca Geoindicators". Geochim. Cosmochim. Acta, 52: 2749-2765.
- [23] AQUATER. "Proyecto Geotérmico Binacional Tufiño-Chiles-Cerro Negro, Estudio de Factibilidad" Informe interno preparado para OLADE. (1987).
- [24] BARBERI, F., PATELLA, D., SCANDIFFIO, G. "Proyecto Geotérmico Binacional Tufiño-Chiles-Cerro Negro, Informe de la Reunión Final de la Junta Asesora" Informe interno preparado para OLADE. (1988).