



Geoquímica preliminar de gases del Sistema Geotérmico del Volcán Azufra

Preliminary gas geochemistry of the Volcan Azufra Geothermal System

CLAUDIA ALFARO¹

GUSTAVO GARZÓN¹

LUCILA BOBADILLA¹

¹INGEOMINAS, Dg. 53 No. 34-53 Bogotá

E-mail: calfaro@ingeominas.gov.co

E-mail: garzon@ingeominas.gov.co

E-mail: lbobadil@ingeominas.gov.co

ALFARO, C., GARZÓN, G. & BOBADILLA, L. (2008): Geoquímica de gases del Sistema Geotérmico del Volcán Azufra.- GEOLOGÍA COLOMBIANA, 33, pp. 91-98, 5 Figs., Bogotá.

RESUMEN

El Volcán Azufra de Túquerres, Nariño, ha sido identificado como uno de los de mayor interés geotérmico en Colombia. La exploración de este sistema, enmarcada en el Programa de Exploración de Aguas Subterráneas de INGEOMINAS (PEXAS), incluye la geoquímica de fluidos descargados por las manifestaciones superficiales como manantiales y respiraderos de vapor. La geoquímica de las aguas termales ha permitido establecer, en trabajos anteriores, una distribución espacial compatible con el modelo de sistemas geotérmicos asociados a estratovolcanes, postular la existencia de un sistema geotérmico de alta temperatura y evidenciar procesos de mezcla del fluido de reservorio con fuente mineralizada no geotérmica.

En este trabajo se presenta una evaluación geoquímica preliminar de los gases emitidos por el respiradero de vapor localizado sobre uno de los domos intracaldéricos, a partir de muestras recolectadas en dos períodos estacionales, en abril y julio de 2005. Los resultados indican que la composición del gas está dominada por la contribución del sistema hidrotermal. Las condiciones de temperatura inferidas en el reservorio (entre 240 y 320°C), son consistentes con las estimadas anteriormente a partir de geotermómetros acuosos. La contribución del sistema magmático es evidenciada a partir de la relación de N₂/Ar y de la concentración ¹³C en CH₄/CO₂.

Palabras Clave: *Volcán Azufra, geotermia, fluidos hidrotermales, fumarola hidrotermal, respiradero de vapor.*

ABSTRACT

Azufra volcano, Nariño, has been identified as one of the systems of highest geothermal interest in Colombia. The exploration of this system, framed in the Groundwater Exploration Program of INGEOMINAS (PEXAS, by its abbreviation in Spanish), includes the geochemistry of fluids discharged by the surface manifestations such as springs and steam vents. The hot springs geochemistry has allowed establishing, in previous work, a spatial distribution compatible with the geothermal model for strato-volcanoes, to formulate the existence of a high temperature geothermal system and to show mixing process of the reservoir fluid with a mineralized non-geothermal source.

In this work a preliminary geochemical evaluation of gases discharged by the steam vent located in one of the intracalderic domes, on samples collected in two seasonal periods, in April and July, 2005. The results show that the gas composition is dominated by the hydrothermal system contribution. The inferred reservoir temperature (between 240 and 320°C), are consistent with those previously estimated from aqueous geothermometers. The magmatic contribution is showed by the N₂/Ar ratio and the ¹³C concentration in CH₄/CO₂.

Key words: *Azufra volcano, geothermics, hydrothermal fluids, hydrothermal fumarole, steam vent.*

INTRODUCCION

El Volcán Azufral (1501-09) es un estratovolcán-calderico, localizado a 1°05'N-77°41' W, entre los municipios de Túquerres, Mallama (Piedrancha), Sapuyes y Santa Cruz (Guachavés), en el Departamento de Nariño, sobre la Cordillera Occidental (Fig. 1). Al interior de su caldera, de aproximadamente 3 km de diámetro, se registran cuatro generaciones de domos, cráteres de erupción hidrotermal y una laguna conocida como Laguna Verde. La elevación máxima de este volcán es de 4070 msnm (MÉNDEZ 1989, FONTAINE & STIX 1993).

Este volcán tiene asociado un sistema geotérmico cuyas manifestaciones superficiales incluyen manantiales termales, cráteres de erupción hidrotermal, respiraderos de vapor y zonas de alteración hidrotermal. La ocurrencia de estas manifestaciones y otras condiciones como su edad reciente, la persistencia de su actividad y la evolución completa del magma de composición andesítica a riolítica, han permitido identificar a este sistema como uno de los de mayor interés geotérmico en Colombia (OLADE 1982).

El objetivo de este trabajo es inferir condiciones termodinámicas del reservorio geotérmico, a partir de la caracterización fluidos hidrotermales de manantiales, en particular de la fase gas del respiradero de vapor localizado en los domos aledaños a Laguna Verde.

ANTECEDENTES

Las manifestaciones termales del sistema geotérmico del Volcán Azufral fueron registradas desde 1849 por Boussingault, quien describió a la Laguna Verde e identificó en los gases de la solfatara, cuya temperatura de descarga midió en 86°C, gas carbónico, sulfuro de hidrógeno y la ausencia de cloruro de hidrógeno (BOUSSINGAULT & ROULIN 1849). Posteriormente, en un estudio sobre aguas minerales de Nariño (MONTENEGRO 1953 en FORERO 1958), se presentó la caracterización y clasificación química de algunos de los manantiales característicos de este sistema geotérmico (Tercán o Quebrada El Baño, La Calera, Chimangual o Quebra Blanca y Sapuyes o Malaver), atribuyéndoles aptitud para uso como agua mineral de bebida.

Los estudios de exploración del sistema geotérmico del Volcán Azufral se iniciaron con el trabajo de reconocimiento de los recursos geotérmicos de Colombia (OLADE 1982) en el que se seleccionó al Volcán Azufral como un área de interés geotérmico prioritario para la exploración geotérmica. Esta investigación incluyó principalmente estudios geovulcanológico e hidrogeoquímico. En el estudio geovulcanológico se estableció la evolución magmática completa del volcán y a partir del estudio de alteración hidrotermal, la zonación vertical de la alteración, que permitió identificar las zonas argílica, filica y propilítica, en donde se localizaría el reservorio geotérmico. El estudio hidrogeoquímico incluyó la caracterización de manan-

tiales de Laguna Verde, Quebrada El Baño y Quebrada Blanca, identificación de procesos de mezcla con aguas de circuitos someros de alto contenido salino y temperatura geoquímica máxima alrededor de 175°C.

KOLLER (1983) calculó temperaturas geoquímicas del orden de 200-220°C, en una zona termal ubicada al noroccidente del cráter, en cercanías al llamado Río Verde (el cual probablemente corresponde a la Quebrada El Baño), aplicando el geotermómetro Na/K/Ca.

Posteriormente, el proyecto binacional de prefactibilidad del sistema Tufiño-Chiles-Cerro Negro (OLADE *et al.* 1987), incluyó en el estudio hidrogeoquímico, la caracterización de los manantiales San Ramón, La Calera y Malaver, posiblemente relacionados con el sistema geotérmico del Azufral. A partir de la compilación de la hidrogeoquímica de esta información y del informe citado de reconocimiento geotérmico (OLADE 1982), se hizo una evaluación geoquímica conjunta de los manantiales (ALFARO 2001) con actualización de muestreos y análisis (ALFARO 2006), a partir de la cual se formuló un modelo geoquímico preliminar en el que se plantea una distribución espacial de los tipos de agua coincidente con el modelo general para sistemas geotérmicos relacionados con estratovolcanes, un proceso de ebullición del fluido geotérmico evidente en superficie en la zona de solfataras y aguas sulfatadas ácidas de Laguna Verde, una mezcla con una fuente salina no termal, probablemente un depósito, que incrementa las concentraciones de bicarbonato, calcio y magnesio, aún en los manantiales más calientes y representativos del sistema geotérmico, un flujo lateral preferencial hacia el suroriente del edificio volcánico y una temperatura estimada en el reservorio de 220°C.

MARCO GEOLÓGICO

El basamento del área de ocurrencia del Volcán Azufral, está conformado por rocas metasedimentarias del Complejo Dagua, de edad Cretácico Inferior a Cretácico Superior y, rocas del Complejo Diabásico de edad Cretácica Superior, las cuales están intruidas por rocas hipobasales de composición generalmente cuarzodiorítica con variaciones a diorítica, con edades desde el Paleógeno, posiblemente Eoceno hasta Mioceno Tardío. La más conocida de estas rocas es el cuerpo intrusivo de Piedracha (TORRES & BERNAL 2002).

Las rocas del Neógeno están conformadas por productos volcánicos de composición andesítica, dacítica y riolítica, depositados discordantemente sobre las unidades anteriores (TORRES & BERNAL 2002).

A partir del estudio estratigráfico y geocronológico de los depósitos recientes (17.790 ± 90 a 3370 ± 70 antes del presente) resultado de la actividad explosiva del Volcán Azufral, TORRES *et al.* (2003), propusieron la definición de la Formación Azufral, la cual cubre un área de 420 km², tienen un espesor cercano a 80 m y está conformada por

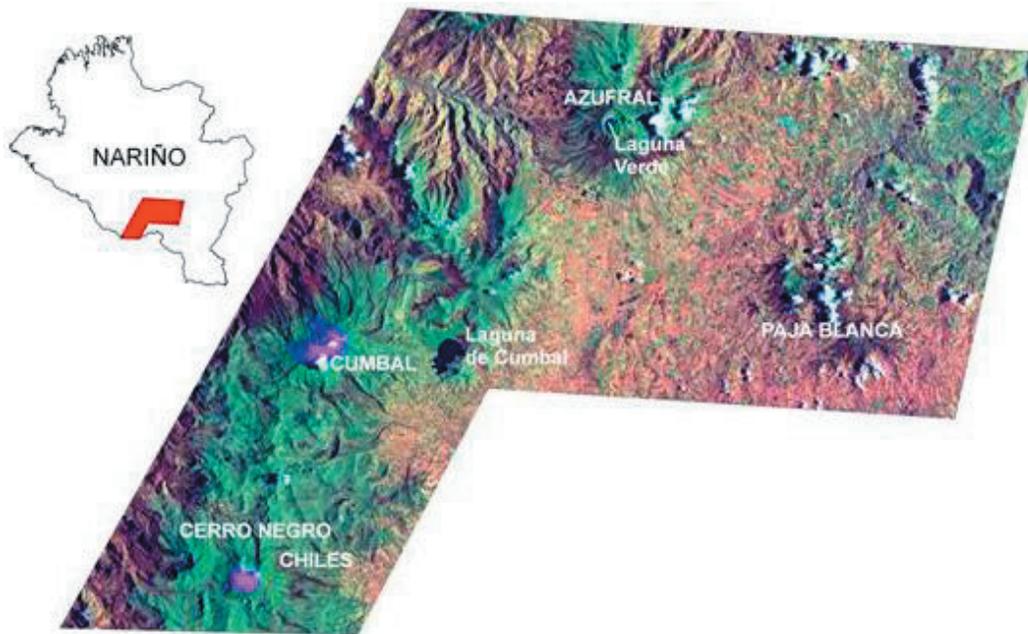


Fig. 1. Localización del Volcán Azufral, sobre la cordillera Occidental, en el Departamento de Nariño. Imagen LANDSAT TM (path 10, row 59) adquirida el 18 de marzo de 1996. Composición en falso color RGB: 1-2-3. En el interior de la caldera se observa la Laguna Verde, rasgo más representativo de este volcán, en cuya margen nororiental y sobre uno de los domos intracaldéricos, se localiza el respiradero de vapor, muestreado para los análisis de gases en que se basa este trabajo. Se incluyen como referencia los volcanes Paja Blanca, Cumbal, Cerro Negro y Chiles.

los miembros Túquerres, La Calera, Cortadera, El Espino, El Carrizo y Laguna. Estos miembros, nombrados de base a techo, están conformados por depósitos de oleadas y flujos piroclásticos principalmente, entre los que La Cortadera es el de mayor extensión. Los más localizados son El Carrizo, sobre las márgenes de las quebradas El Carmelo y El Carrizo y Laguna Verde, que aflora en la parte alta de la carretera Túquerres-Laguna Verde.

La complejidad tectónica en el área del Volcán Azufral, se deriva de su ocurrencia en la convergencia de las tres cordilleras y del estrechamiento y levantamiento de la depresión interandina del valle del Cauca-Patía. La estructuras más importantes de la zona son el sistema de fallas Cali-Patía, conformado por una serie de fallas inversas orientadas en dirección N 10° E a N 35° E y las fallas transversales de dirección NW, que cortan las fallas longitudinales de este sistema (TORRES & BERNAL 2002).

METODOLOGÍA

Muestreo y análisis

El muestreo de gases se realizó en ampollas de vidrio al vacío siguiendo la metodología propuesta por GIGGENBACH & GOGUEL (1989), modificada por el laboratorio de análisis (Thermochem Laboratory & Consulting Service).

Las ampollas de vidrio al vacío también conocidas como Botellas de Giggenbach, fueron adicionadas con 50 ml de solución de hidróxido de sodio 4 N y 7.5 ml de solución de cloruro de cadmio 1 N. Los gases ácidos atrapados en la fase alcalina y el sulfuro precipitado como sulfuro de cadmio, fueron analizados por vía húmeda. Los gases no condensables, fueron analizados por cromatografía de gases.

Separadamente se realizó el muestreo para monóxido de carbono (CO) en Botella de Giggenbach al vacío, sin solución. El análisis de la relación CO/N₂, fue realizado también por cromatografía de gases.

Los análisis de $\delta^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ en CO₂ y CH₄ se realizaron en las muestras alcalinas, por la técnica de espectrometría de masas.

Interpretación

La interpretación de los datos de composición química e isotópica de los gases se basó principalmente en geoindicadores de temperatura, a partir de composiciones relativas y métodos gráficos (GIGGENBACH 1991, 1997, NICHOLSON 1993, ARNORSSON 2000).

La estimación de temperatura se basó los geotermómetros siguientes:

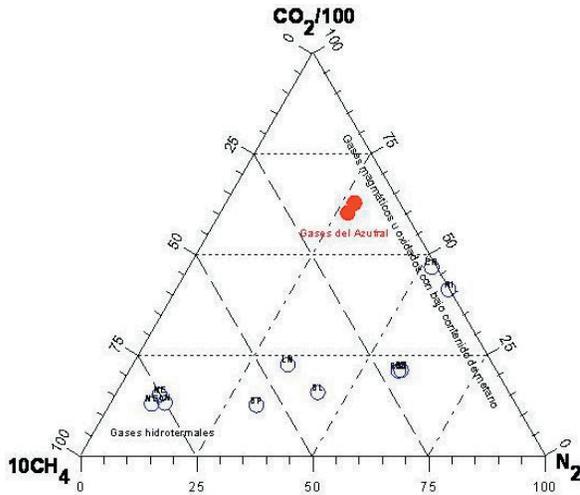


Fig. 2. Composición relativa $\text{CO}_2\text{-CH}_4\text{-N}_2$ (GIGGENBACH *et al.* 1990). Los gases del Azufral, alejados de la zona de gases hidrotermales (más ricos en CH_4), reflejan la posible contribución del sistema volcánico magmático y/o la oxidación de los gases carbonados. Los puntos azules corresponden a gases de manantiales y fumarolas del Nevado del Ruiz: NE y LN= Las Nereidas, BL y BP = manantiales de Botero Londoño, ER y RI = fumarolas volcánico-magmáticas localizadas en el cráter.

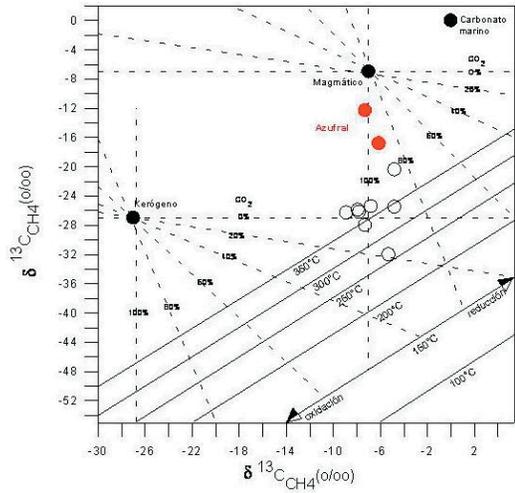


Fig. 3. Concentración de ^{13}C en CH_4/CO_2 (GIGGENBACH 1997). El gas hidrotermal altamente oxidado emitido por el Volcán Azufral, conserva la firma isotópica del CO_2 magmático ($\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ -7.3 y -6.12). La concentración de ($\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$) refleja menor reducción de CO_2 magmático que los de gases hidrotermales de pozos de sistemas geotérmicos de Nueva Zelanda (círculos vacíos). La temperatura estimada para el geotermómetro isotópico, superior a 500°C es irreal y excede su rango de aplicación.

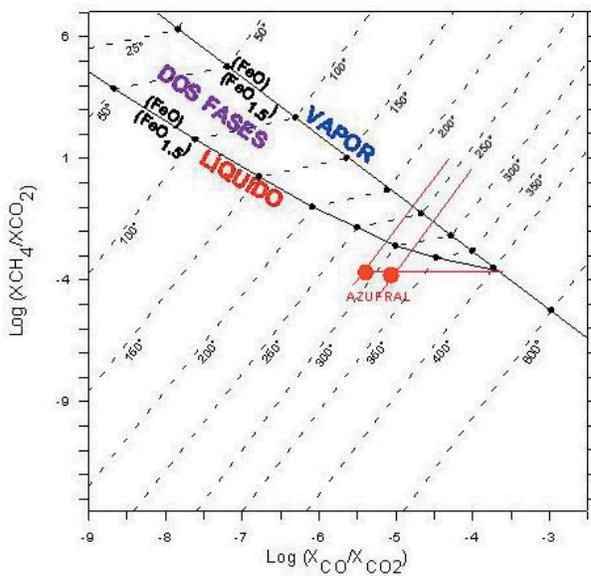


Fig. 4. Evaluación de las condiciones de equilibrio CH_4 , CO-CO_2 (GIGGENBACH 1991). Las líneas continuas representan las curvas de equilibrio para el buffer de roca redox más importante en los sistemas hidrotermales, en fase líquida y fase vapor. Sobre las líneas discontinuas se infieren temperaturas de reservorio de 280 y 320°C para equilibrio homogéneo de los tres gases disueltos en fase líquida, 240 y 270°C , en fase gas 400 y 420°C , para el equilibrio $\text{CH}_4\text{-CO}_2$.

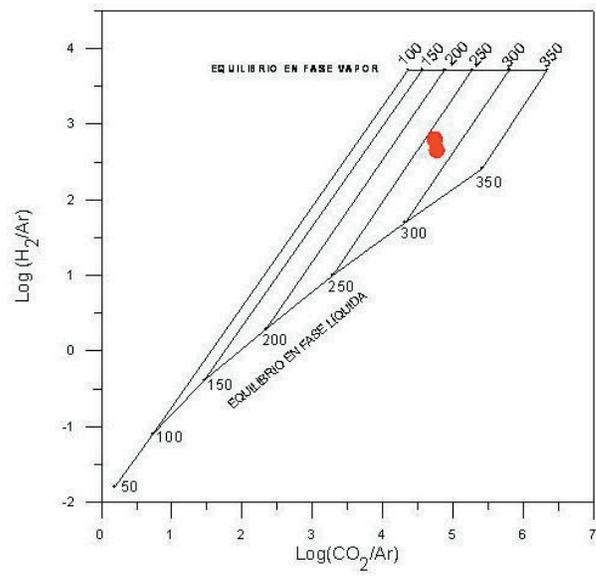


Fig. 5. Relación de las temperaturas geoquímicas H_2/Ar y CO_2/Ar (GIGGENBACH 1991). Se infiere una condición global de equilibrio en dos fases para el sistema geotérmico del Azufral. La temperatura inferida es de 270°C .

H_2/Ar $t = 70 * (2.5 + \text{LOG}(X_{H_2}/X_{Ar}))$, en donde t es temperatura en grados centígrados y X la fracción molar del gas (GIGGENBACH 1991).

CO_2/Ar . $\text{Log}(X_{CO_2}/X_{Ar}) = (0.0277 * t) - 7.53 + (2048/(t+273))$ (GIGGENBACH 1991).

$CO_2-H_2S-H_2-CH_4$. $t = (24775 / (((2 * \text{LOG}(X_{CH_4}/X_{CO_2})) -$

$(6 * \text{LOG}(X_{H_2}/X_{CO_2})) + (3 * \text{LOG}(X_{H_2S}/X_{CO_2})) + (7 * \text{LOG}(1)) + 36.05))) - 273$ (D'AMORE & PANICHI 1980 en NICHOLSON 1993).

CH_4/CO_2 . $t = (4625 / (10.4 + \text{LOG}(X_{CH_4}/X_{CO_2}))) - 273$. (GIGGENBACH 1991)

CO_2 . $\text{LOG}(CO_2) = (34.73 + (73192/T) - (11829000/(T^2)) + (0.18923 * T) - (86.187 * \text{LOG}(T))) - 273$. En donde CO_2 se expresa en moles/kg de vapor y T es la temperatura absoluta (ARNORSSON *et al.* 1983 en NICHOLSON 1993)-

Basado en CO . $\text{LOG}(X_{4CO}/X_{3CO_2} * X_{CH_4}) = (8.065 - (13606/t (^{\circ}C))) - 273$. (CHIODINI & CIONI 1989 en NICHOLSON 1993)

CO_2/H_2 . $t = -53.4 * (\text{LOG}(X_{CO_2}/X_{H_2})) + 352$ (KOGA 1987 en KOGA 2000)

$\delta^{13}C$ CH_4-CO_2 . $t = (15790 / (\delta^{13}CO_2 - \delta^{13}CH_4 + 9)) - 273$. (LYON & HULSTON 1984 en ARNORSSON 2000).

$\delta^{13}C$ CH_4-CO_2 . $\delta^{13}CO_2$ (‰) - $\delta^{13}CH_4$ (‰) = $(15.25 * (1000/(t + 273))) + (1000000/(t + 273)^2) - 9.56$. (D'AMORE & PANICHI 1987 en NICHOLSON 1993).

RESULTADOS OBTENIDOS

Respiradero de vapor

La tabla 1 presenta la composición de los gases descargados por el respiradero de vapor del Volcán Azufzal, localizado sobre el domo nororiental de la Laguna Verde, expresada en porcentaje en volumen. Su temperatura relativamente baja (inferior a 100 ° C), la composición dominada por gas carbónico y sulfuro de hidrógeno, en una relación inferior a 100 (en ausencia de HCl y muy bajas concentraciones de SO_2 como se ha reportado en trabajos anteriores (ALFARO 2001)) y la relación CH_4/CO_2 superior a $1E-3$ (GIGGENBACH *et al.* 1990), indican la relación genética de estos gases con el sistema hidrotermal.

La composición relativa $CO_2-CH_4-N_2$, presentada en la figura 2, hace evidente la elevada concentración de CO_2 en el sistema geotérmico del Volcán Azufzal, la cual resulta aún mayor a la registrada por fumarolas volcánico-magmáticas del Nevado del Ruiz.

Los resultados de los análisis de $^{13}C/^{12}C$ en CO_2 y CH_4 , también son registrados en la Tabla 1. La concentra-

ción de ^{13}C en CO_2 de -7.3 y -6.12 ‰, está dentro del rango -6.5 ± 2.5 ‰ considerado típico para el CO_2 del manto (NISHIO *et al.* 1998 en CHRISTENSON *et al.* 2002), en donde se origina el CO_2 de los sistemas hidrotermales asociados a volcanes, como se ilustra en la figura 3. Los puntos vacíos corresponden a pozos de campos geotérmicos de Nueva Zelanda, con temperaturas entre 210 y 330 °C (GIGGENBACH 1997). La concentración de ^{13}C en CH_4 , es más ligera que la del fluido de los pozos geotérmicos tomados como referencia (-12.3 y -16.8‰ frente al rango de -20.4 a -32.0) indicando una menor reducción del CO_2 magmático en el sistema geotérmico del Azufzal.

La relación N_2/Ar de 262 y 253, es comparable a la calculada para la fumarola hidrotermal de Las Nereidas en el Nevado del Ruiz (294) (GIGGENBACH 1990). Esta relación, mayor a la del aire, equivalente a 84, y a la del componente meteórica saturada en aire que está alrededor de 38, indica la contribución de la fuente magmática que como en el caso de una de las fumarolas magmáticas del cráter del Ruiz, alcanzó valores de 1134 (GIGGENBACH 1990) y que en ocasiones puede alcanzar valores hasta de 2000 (GIGGENBACH 1991).

Las temperaturas estimadas para el reservorio a partir de la composición de gases son presentadas en la Tabla 2. El rango de temperaturas oscila entre 240 y 423 °C lo cual permite clasificar al Azufzal como un sistema geotérmico de alta temperatura (>225 °C). Las temperaturas más bajas, estimadas a partir del geotermómetro CO_2/H_2 son cercanas a la calculada aplicando el geotermómetro acuoso Na-K-Mg (alrededor de 220 °C) (ALFARO 2001). La ecuación del geotermómetro $CO-CO_2-CH_4$ señala una temperatura de 283 y 252 °C, que resulta muy cercana a la calculada por el método gráfico para evaluación de este geotermómetro (GIGGENBACH 1987), presentado en la figura 4, y corresponde al equilibrio homogéneo de CO , CO_2 y CH_4 disueltos en fase gas (240 y 270 °C). Al menos dos (2) temperaturas más pueden inferirse del diagrama de la figura 4, de acuerdo con la condición de equilibrio entre la fase (líquida, líquido-vapor y vapor) y el buffer redox Fe(II)-Fe(III) de la roca. Estas temperaturas corresponden a 280 y 320 °C para equilibrio homogéneo de los tres gases disueltos en fase líquida y, 400 y 420 °C, para el equilibrio metano-gas carbónico con la roca en donde el coeficiente de partición entre las fases líquida y vapor, es equivalente a uno (1).

La temperatura CH_4/CO_2 estimada en 430 y 417 °C, es consistente con la máxima inferida a partir del método gráfico del geotermómetro $CO-CO_2-CH_4$. Teniendo en cuenta que ésta es superior a 300 °C probablemente refleja la baja velocidad de equilibrio del metano señalando temperaturas que corresponden a las zonas más profundas del reservorio, como planteó GIGGENBACH (1991). Al parecer la reacción de intercambio isotópico de ^{13}C entre CO_2-CH_4 tampoco ha alcanzado el equilibrio como indica la muy alta temperatura calculada e ilustrada en la figura 3, que excede una vez más el rango de aplicación del geotermómetro (500 °C). La ausencia en las condiciones de equilibrio, se

Tabla 1. Composición de gases descargados por el respiradero de vapor del Azufra, localizado a 3954 msnm, 612468 N y 595119 E.

Fecha	Abril de 2005	Julio de 2005
Temperatura (°C)	85.4	90.1
Gas/vapor (moles /10 ⁶ moles H ₂ O):	357716	1792488
Análisis de gases	% v/v gas seco	% v/v gas seco
CO ₂	96.300	96.000
H ₂ S	2.520	2.440
NH ₃	<1.01E-02	<7.37E-03
Ar	0.002	0.002
N ₂	0.424	0.436
CH ₄	0.015	0.019
H ₂	0.722	1.070
CO	0.001	0.0004
N ₂ /Ar	262	253
CH ₄ /CO ₂	0.00015	0.00020
CO ₂ /H ₂ S	38.21	39.34
Análisis isotópico ¹³ C/ ¹² C	δ ¹³ C (‰), VPDB (1)	δ ¹³ C (‰), VPDB
CO ₂	-7.3	-6.12
CH ₄	-12.3	-16.8
1. Mediciones relativas a VPDB = 0		
VPDB = "Vienna distribution of Belemnite from the Cretaceous Peedee formation, South Carolina"		

justifica si se pone en consideración por un lado la baja velocidad de esta reacción (entre 1.000 y 10.000 años, NICHOLSON (1993) y por otro, la edad de los últimos eventos que habrían ocurrido entre 1.445 y 1.945 según interpretación de dataciones con ¹⁴C (CORTES & CALVACHE 1997 en CALVACHE 1999).

A partir del geotermómetro de CO₂, mejor aplicable a fumarolas con temperatura superior a 100°C, resultó en 406 y 417 °C, lo cual excede la temperatura de 300°C, considerada límite superior del geotermómetro por la estabilidad de la calcita en el sistema (NICHOLSON 1993).

El geotermómetro CH₄-CO₂-H₂-H₂S, señaló temperaturas cercanas a las calculadas con base en los geotermómetros CO₂ y CH₄/CO₂ (407 y 423°C), pero mucho mayores a las calculadas con el geotermómetro CO₂/H₂ (239 y 248°C), el cual es considerado una simplificación de éste.

Los geotermómetros basados en las relaciones más simples, H₂/Ar y CO₂/Ar, registran temperaturas relativamente cercanas 360-371°C y 319°C, respectivamente, aún cuando alcanzan el equilibrio a velocidades diferentes, lo cual según plantea GIGGENBACH (1991), permite evaluar de forma global el estado de equilibrio del sistema. La relación de estos dos geotermómetros representada en el diagrama de la figura 5, sugiere condiciones de equilibrio, en dos fases, a una temperatura cercana a 270°C.

Gases en manantiales

La composición de los gases emitidos por los ma-

nantiales conocidos como Malaver y Tercán (localizados unos 11 km al suroriente y 4 km al occidente del cráter, respectivamente), los cuales registran la mayor descarga de gas entre los manantiales del sistema geotérmico del Azufra, es presentada en la Tabla 3. Es claro que el gas carbónico es el más abundante y que las muestras están contaminadas por la presencia de aire libre, como sugieren las relaciones N₂/O₂ y N₂/Ar, principalmente para las muestras de Tercán y una de las de Malaver colectadas en abril de 2005. Los gases restantes, sulfuro de hidrógeno, amoníaco, metano e hidrógeno, registran concentraciones muy bajas, no cuantificables, lo cual implica la disminución de concentración relativa de estos gases en el flujo lateral con respecto al flujo ascendente representado en los gases de la solfatara, o una fuente diferente. La ausencia de dichas especies gaseosas, impide la evaluación de dirección de flujo, a partir de variaciones en la composición relativa de éstos respecto del gas carbónico (CO₂/NH₃, CO₂/H₂S, CO₂/H₂, CO₂/H₂S).

DISCUSION DE RESULTADOS

Las temperaturas geoquímicas para el sistema geotérmico del Volcán Azufra por encima de 400°C, no son confiables principalmente por exceder el rango de aplicación de los geotermómetros como en el caso de CO₂, ¹³C y CH₄/CO₂. Temperaturas del mismo orden se estimaron con el geotermómetro CH₄-CO₂-H₂-H₂S. Sin embargo la confiabilidad de este último ha sido considerada baja porque una de las variables de que depende es la presión de CO₂, la cual es seleccionada de manera empírica (ARNORSSON 2000) y porque está basado en premisas poco

Tabla 2. Temperaturas estimadas para el reservorio geotérmico del Volcán Azuftral, a partir de geotermómetros de gases.

Geotermómetro	t °C	t °C
H ₂ /Ar ⁽¹⁾	360	371
CO ₂ /Ar ⁽²⁾	319	319
CO ₂ -H ₂ S-CH ₂ -H ₄ ⁽³⁾	407	423
CH ₄ /CO ₂ ⁽⁴⁾	430	417
CO ₂ ⁽⁵⁾	406	419
CO-CO ₂ -CH ₄ ⁽⁶⁾	283	252
CO ₂ /H ₂ ⁽⁷⁾	239	248
δ ¹³ C (‰) CH ₄ /CO ₂ ⁽⁸⁾	955	629
δ ¹³ C (‰) CH ₄ /CO ₂ ⁽⁹⁾	836	541
(1) GIGGENBACH 1991	(6) CHIODINI & CIONI 1989	
(2) GIGGENBACH 1991	(7) KOGA 1987	
(3) D'AMORE & PANICI 1980	(8) LYON & HULSTON 1984	
(4) GIGGENBACH 1991	(9) D'AMORE & PANICHI 1987	
(5) ARNORSSON <i>et al.</i> 1983		

TABLA 3. Composición de gases descargados por manantiales asociados al sistema geotérmico del Volcán Azuftral.

Porcentaje de gas seco (% V/V)						
Punto muestreo	Fecha	T(°C)	CO ₂	H ₂ S	NH ₃	Ar
Tercán	Abr-05	47.2	93.30	<4.02E-02	<5.29E-03	0.09
Malarver 1	Abr-05	30.3	79.40	<8.07E-02	<4.81E-03	0.26
Malarver 1	Abr-05	30.6	97.80	<4.19E-02	<5.88E-03	0.05
Malarver 1	Jul-05	28.50	98.60	<3.74E-02	<5.44E-03	0.03
Porcentaje de gas seco (% V/V)				Relaciones		
Punto muestreo	O ₂	N ₂	CH ₄	H ₂	N ₂ /Ar	N ₂ /O ₂
Tercán	1.86	6.74	<3.99E-03	<3.19E-02	77.38	3.62
Malarver 1	5.33	20.50	<8.91E-03	<7.14E-02	80.39	3.85
Malarver 1	0.95	2.28	<3.96E-03	<3.16E-02	43.85	2.39
Malarver 1	0.49	1.45	<2.68E-03	<2.14E-02	51.42	2.96

probables como la generación de CH₄ a partir de grafito, CO₂ y H₂ y la formación de H₂S a partir de anhidrita y piritita (GIGGENBACH 1980 en NICHOLSON 1993).

En resumen, las temperaturas más confiables para el reservorio de este sistema geotérmico son las calculadas por los geotermómetro CO-CO₂-CH₄ y H₂/Ar versus CO₂/Ar, en el rango entre 240 y 310°C.

CONCLUSIONES

El sistema geotérmico del Volcán Azuftral con temperaturas geoquímicas superiores a 225°C, puede ser clasificado como de alta temperatura. Considerando la estima-

ción de temperatura en el reservorio como único criterio, este sistema geotérmico tiene un potencial de utilización muy amplio que va desde los usos directos de la energía térmica y el contenido mineral de sus fluidos hidrotermales, en balneología, producción agrícola, acuicultura, secados industriales, entre otros, hasta la generación eléctrica en plantas geotérmicas convencionales, por uso indirecto de la energía térmica a través de su conversión en energía mecánica.

La alta concentración de CO₂ con respecto a CH₄ y N₂ y la concentración de ¹³C en CH₄, permiten proponer un ambiente relativamente oxidante en la parte alta de este sistema hidrotermal, lo cual es coherente con la oxidación

del H₂S que da lugar a la formación de fuentes termales ácidas sulfatadas calentadas por vapor (ALFARO 2001) y a la alteración hidrotermal argílica avanzada, caracterizada por la presencia de alunita y caolinita (CARVAJAL & ROMERO 2006).

La relación genética del sistema hidrotermal con el sistema volcánico se hace evidente en la firma isotópica del CO₂, y en la relación N₂/Ar.

Es probable que la interacción fluido-roca en este sistema geotérmico se halle en equilibrio global, aún cuando no haya alcanzado equilibrio en reacciones de baja velocidad.

AGRADECIMIENTOS

Al Proyecto Multinacional Andino -PMA-, por financiar los análisis de gases en un laboratorio especializado en fluidos hidrotermales y, en particular, a la Gloria Ruiz y Marta Calvache de INGEOMINAS por gestionar esta colaboración.

A Henry Villegas, por preparar la imagen de satélite incluida en la figura de localización.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BALFARO, C. 2001. Geoquímica del sistema geotérmico del Volcán Azufral. Informe preliminar. Segunda versión. INGEOMINAS. Informe Técnico no Publicado. 28 p. Bogotá.
- ALFARO, C. 2006. Geoquímica preliminar del sistema hidrotermal del Volcán Azufral de Túquerres, Nariño. Memorias. II Congreso Colombiano de Hidrogeología, Bucaramanga, Abril de 2006.
- ARNORSSON, S (Ed) . 2000. Isotopical and chemical techniques in geothermal exploration, development and use. IAEA, Viena, 351p.
- BOUSINGAULT, J. & ROULÍN, F. 1849. Viajes científicos a los Andes ecuatoriales. Instituto Colombiano de Cultura Hispánica. Colección Centenario, Bogotá, 320p.
- CALVACHE, M. 1999. Informe Volcán Azufral. INGEOMINAS. No publicado. Pasto. 45p.
- CARVAJAL, D. & ROMERO, D. 2006. Cartografía de zonas de alteración hidrotermal del Volcán Azufral, Nariño. Exploración de Aguas Subterráneas en el Altiplano Nariñense. Tomo V. INGEOMINAS. Informe Interno. Bogotá.
- CHRISTENSON, B., MROCZEK, E., KENNEDY, B., SOEST, M., STEWART M. & LYON, G. 2002. Ohaaki reservoir chemistry: characteristic of an arc-type hydrothermal system in the Taupo Volcanic Zone, New Zealand. Journal of Volcanology and Geothermal Research. 115. pp 53-82
- FONTAINE, E. & STIX, J. 1993. Évolution pétrologique et géochimique du complexe de dômes du volcan Azufral (Colombie, Amérique du Sud). C.R. Acad. Sci. Paris. pp. 1501-1508.
- FORERO, H. 1958. Fuentes termales en Colombia. Investigación

de Geología Económica. Ministerio de minas y petróleos. Bogotá, 274p.

GIGGENBACH, W. 1987. Redox processes governing the chemistry of fumarolic gas discharges from White Island, New Zealand. Applied Geochemistry. 2. 143-161 pp.

GIGGENBACH, W. G. & GOGUEL, R. L. 1989. Collection and analysis of geothermal and volcanic water and gas discharges. Report No. CD 2401. Fourth Edition. Chemistry Division. Department of Scientific and Industrial Research, Petone, New Zealand. 81 p

GIGGENBACH, W. F. 1991. Chemical techniques in geothermal exploration. In: Applications of geochemistry in geothermal reservoir development. Edited by Franco D'Amore. Unitar. Rome-Italy, pp 119-144.

GIGGENBACH, W. F., GARCÍA, N., LONDOÑO, A., RODRÍGUEZ, L., ROJAS, N. & CALVACHE, M. 1990. The chemistry of fumarolic vapor and termal-spring discharges from the Nevado del Ruiz volcanic-magmatic-hydrothermal system, Colombia. Journal of Volcanology and Geothermal Research, Vol. 42 pp13-29

GIGGENBACH, W. 1997. Relative importance of thermodynamic and kinetic processes in governing the chemical and isotopic composition of carbon gases in high-heatflow sedimentary basins. Geochímica et Cosmochímica Acta. Vol. 61, No. 17. pp. 3763-3785

KOGA, A., 2000. Hydrothermal geochemistry. The first group training course on geothermal energy and environmental sciences. Kyushu University. Notas de clase. 81 pp.

KOLLER, B., 1983. Geochemistry and subsurface temperatures calculated from the Na/K/Ca geothermometer of some hot springs associated with the Tertiary-Quaternary volcanism of Southwestern Colombia. Geología Norandina, No. 8, 13-20 pp.

MÉNDEZ, R. 1989. Catálogo de volcanes activos de Colombia. Boletín Geológico. Vol. 30. No. 3. INGEOMINAS. 75 pp. Bogotá

NICHOLSON, K. 1993. Geothermal fluids. Chemistry and exploration techniques. Heilderber, 263p.

OLADE, ICEL, CONTECOL & GEOTÉRMICA ITALIANA, S. R.L., 1982. Estudio de reconocimiento de los recursos geotérmicos de la República de Colombia. 455 pp. Bogotá

OLADE, INECEL, ICEL & AQUATER, 1987. Proyecto geotérmico binacional Tufiño-Chiles-Cerro Negro. Estudio de Prefactibilidad. Anexo B: Geoquímica. Bogotá. 41p.

TORRES, P. & BERNAL 2002. cartografia geologica del volcan azufral de tuquerres, nariño. V. 1.0. Memoria explicativa. INGEOMINAS. Bogotá, 16p

TORRES, P., CALVACHE, M., CORTÉS, G. & MONSALVE, M. 2003. Propuesta estratigráfica para la definición formal de la Formación Azufral, Colombia. Memorias del IX Congreso Colombiano de Geología. Medellín Julio de 2003.

Manuscrito recibido Noviembre 2008; aceptado Diciembre 2008.