

Resultados preliminares del estudio geoquímico de la zona geotérmica de Rancho Nuevo, Guanajuato

J.F.A. Landa-Arreguín¹, R.E. Villanueva-Estrada¹, R.G. Rocha-Miller¹, M.T.J. Rodríguez-Salazar², A.A. Rodríguez-Díaz¹ y E. Hernández-Mendiola³

¹Departamento de Recursos Naturales, Instituto de Geofísica, UNAM. ²Departamento de Química Analítica, Facultad de Química, UNAM. ³Departamento de Geoquímica, Instituto de Geología, UNAM.

Correo: jorgefl@igeofisica.unam.mx

RESUMEN

Rancho Nuevo es una localidad que se ubica al este del estado de Guanajuato donde existe una manifestación hidrotermal con emanación de gases de reciente actividad e interés geotérmico, debido a que presenta temperaturas de descarga importantes ($>90^{\circ}\text{C}$). Se le considera un sitio importante para continuar estudios de exploración geotérmica. El objetivo de esta investigación es proponer un modelo geoquímico de la actividad hidrotermal de Rancho Nuevo, a partir de la información de alteraciones hidrotermales y la geoquímica de sus fluidos. En este trabajo se presentan y comparan la geoquímica de fluidos hidrotermales y la mineralogía entre Rancho Nuevo y otros sitios aledaños (pozos de agua y un manantial). La campaña de muestreo se realizó en agosto de 2016 y los resultados obtenidos son reportados por primera vez en este trabajo.

Los datos de campo medidos en la zona de Rancho Nuevo son: temperatura de descarga de 92°C , conductividad eléctrica de $1188 \mu\text{S}/\text{cm}$, pH ligeramente básico de 8.3. La concentración de bicarbonatos es de 506 mg/l , sulfuros de 0.74 mg/l y de SiO_2 de 205 mg/l . Por otro lado, el análisis químico en laboratorio revela que el tipo de agua es bicarbonatada clorurada sódica, enriquecida en As (0.3 mg/l), F- (13.9 mg/l) y B (10.5 mg/l). El agua de otros sitios alrededor de Rancho Nuevo, es de tipo bicarbonatada sódica, con concentraciones de As de 0.003 mg/l o menos, F- menores a 0.9 mg/l y B menores a 4 mg/l . Sólo existe un manantial localizado al norte del sitio de interés que presenta concentraciones similares de As (0.3 mg/l), F- (11.7 mg/l) y B (10.6 mg/l) y cuyo tipo de agua es también bicarbonatada clorurada sódica. De acuerdo a la mineralogía, en la zona de Rancho Nuevo y zonas aledañas hay presencia de pirita (FeS_2), arsenopirita (FeAsS), estibinita (Sb_2S_3), Barita (BaSO_4) y otros minerales de alteración como ópalo y montmorillonita, todos de origen hidrotermal.

De acuerdo a los resultados obtenidos hasta el momento, el agua de Rancho Nuevo se encuentra en equilibrio parcial y muy cercano a la línea de equilibrio total con los minerales disueltos en el agua de acuerdo al diagrama ternario de concentraciones relativas de Na, K y Mg. Por lo anterior y debido a que existen procesos de mezcla y un pH ligeramente alcalino en el sistema, la geotermometría de Na-K a partir de las concentraciones iónicas indica que la temperatura a profundidad es de aproximadamente 227°C . Esta temperatura corresponde a un sistema termal de temperatura alta, lo que lo hace un sitio de interés para continuar con los estudios geocientíficos necesarios.

Palabras clave: Exploración, geoquímica de agua, geotermometría, mineralogía hidrotermal.

Preliminary results of the geochemical study on the Rancho Nuevo, Guanajuato, geothermal zone

ABSTRACT

Rancho Nuevo is located on east of the state of Guanajuato where there is a hydrothermal manifestation with emanation of gases of recent activity and geothermal interest, due to the fact that it has significant discharge temperatures ($>90^{\circ}\text{C}$). It is considered an important site for developing more geothermal exploration studies. The goal of this research is to propose a geochemical model of the hydrothermal activity of Rancho Nuevo, based on the information of hydrothermal alterations and the geochemistry of its fluids. In this paper we present and compare the geochemistry of hydrothermal fluids and mineralogy between Rancho Nuevo and other surrounding sites (water wells and a spring). The sampling campaign was conducted on August 2016 and the results obtained are reported for the first time in this work.

The field data measured in the Rancho Nuevo area are: discharge temperature of 92°C , electrical conductivity of 1188 $\mu\text{S}/\text{cm}$, slightly basic pH of 8.3. The concentration of bicarbonates is 506.03 mg/l, sulfides 0.74 mg/l and SiO_2 205 mg/l. On the other hand, the chemical analysis in laboratory indicate the type of water is bicarbonate sodium chloride, enriched in As (0.297 mg/l), F^- (13.9 mg/l) and B (10.5 mg/l). Water type from other sites around Rancho Nuevo is sodium bicarbonate, with As concentrations of 0.003 mg/l or less, F^- less than 0.9 mg/l and B less than 4 mg/l. There is only one site located on north of Rancho Nuevo that presents similar concentrations of As (0.34 mg/l), F^- (11.7 mg/l) and B (10.61 mg/l) and whose water type is also bicarbonate sodium chloride. According to mineralogy, there are pyrite (FeS_2), arsenopyrite (FeAsS), stybinite (Sb_2S_3), Barite (BaSO_4) and other altering minerals such as opal and montmorillonite, all present in the area of Rancho Nuevo and surrounding areas as a result of hydrothermal alteration processes.

According to the results of this campaign, water of the spring of Rancho Nuevo is in partial equilibrium and very close to the total equilibrium line with the minerals dissolved in the water, according to the ternary diagram of relative concentrations of Na, K and Mg. Due to that, and the fact that there are mixing processes and a slightly alkaline pH in the system, the Na-K geothermometry from the ionic concentrations indicates that the temperature at depth is approximately 227°C . This temperature corresponds to a high temperature geothermal system, which makes it a site of interest to continue with the necessary geoscientific studies.

Keywords: Exploration, water geochemistry, geothermometry, hydrothermal mineralogy.

Introducción

En la actualidad existe una tendencia mundial al uso de energías renovables, una de las cuales es la geotermia. México cuenta con varios campos geotérmicos en explotación, con una capacidad instalada de casi 1000 MW, por lo que se le considera como uno de los países líderes en el aprovechamiento de la energía geotérmica a nivel mundial.

En materia de mitigación, la Ley de Cambio Climático de 2012 tiene entre otros objetivos, el desarrollo y uso de fuentes renovables. Establece como meta-país que para el año 2024 el 35% de la energía eléctrica deberá ser producida por fuentes renovables. México cuenta con recursos geotérmicos para contribuir a alcanzar esas metas, pues se tienen reportadas 2361 manifestaciones termales (Iglesias et al., 2011). Sin embargo la mayoría ha sido poco estudiada y aprovechada.

Por lo anterior, es necesario investigar, caracterizar y entender nuestros recursos geotérmicos a partir de análisis multidisciplinarios, para poder destinarles algún uso productivo que impulse su desarrollo, sin poner en riesgo el medio natural ni la salud de los seres humanos.

Área de estudio

Rancho Nuevo se localiza en la porción oriental del estado de Guanajuato y en la parte centro-norte de la provincia fisiográfica conocida de la Faja Volcánica Transmexicana, entre los municipios de Celaya y Apaseo el Grande (Figura 1).

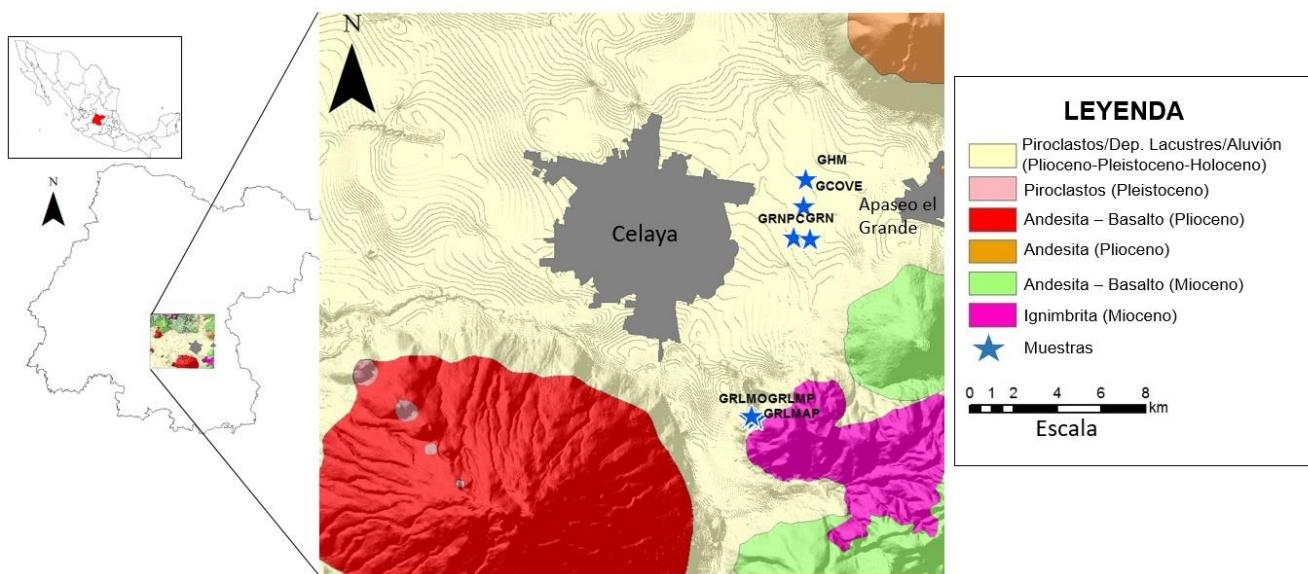


Figura 1. Localización y geología de la zona de estudio.

Geológicamente, la unidad aflorante más antigua en la región es una ignimbrita brechada con intercalaciones de depósitos piroclásticos de edad Mioceno-Plioceno. Cubriendola se encuentra la Ignimbrita Huapango cuya edad oscila en los 5.3 Ma (Aguirre-Díaz y López Martínez, 2001; 2003). Sobreyaciendo a estas unidades piroclásticas existen derrames de lava de composición andesítica y basáltica, así como depósitos piroclásticos del Plioceno (Nieto-Samaniego et al., 1999; Aguirre-Díaz y López-Martínez, 2003). Finalmente hay aluvión y depósitos lacustres y piroclásticos, con edades Plioceno-Pleistoceno-Holoceno (Nieto-Samaniego et al., 1999). El basamento está definido por rocas vulcano-sedimentarias y sedimentos calcáreos arcillosos (Echegoyén-Sánchez et al., 1970).

En Rancho Nuevo (GRN), se presenta actividad termal que según los pobladores es intermitente y de reciente reactivación; es una manifestación que se caracteriza por tener una descarga en superficie de tipo gasohidrotermal. A unos pocos cientos de metros de ésta, se ubica un pozo de agua que abastece a dicha comunidad (GRNPC). Al norte de la zona de estudio, dentro de una hacienda llamada “Los Mezquites”, se localiza un manantial termal (GHM) con descarga focalizada dentro de un pequeño lago de aproximadamente unos 6 metros de diámetro. Al sur y a un par de kilómetros de la zona de estudio se encuentra un pozo de agua perteneciente a una empresa privada de alimentos congelados (GCOVE). Unos kilómetros más hacia el sur, en la localidad conocida como rancho La Machuca, se muestraron 3 pozos de agua (GRLMP, GRLMO, GRLMAP) que abastecen a la población. El agua de todos los pozos muestreados son de tipo termal cuyas temperaturas oscilan entre los 33°C y 58°C.

Metodología

Se muestrearon y analizaron pozos y manantiales en sitios que pertenecen a las regiones de Celaya y Apaseo el Grande, en el estado de Guanajuato. Las muestras de agua se recolectaron durante el mes de agosto de 2016, en época de lluvia.

Parámetros de campo

Los parámetros medidos en campo fueron: temperatura, pH conductividad eléctrica (CE), sólidos totales disueltos (STD), concentración de sílice, concentración de sulfuros. Para medir la temperatura se utilizó un termómetro digital láser y uno de mercurio. Los demás parámetros de campo fueron medidos con equipos HACH cuyas técnicas de medición están validadas por el Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (1995). La concentración de bicarbonatos se midió en un titulador volumétrico automático, en un lapso no mayor a 72 horas, en la Unidad de Geoquímica de Fluidos Geotérmicos del CeMIE-Geo, ubicada en el Instituto de Geofísica de la UNAM.

Análisis químicos de agua

Los análisis químicos de iones mayores fueron hechos en el Laboratorio de Geoquímica Ambiental por cromatografía iónica, y el análisis de elementos traza en el Laboratorio de Geoquímica Multielemental e Isotópica (LAGEMI) por espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS), ambos en el Instituto de Geología, UNAM.

Análisis mineralógicos de suelo

Se colectaron también muestras de suelos en la periferia de la manifestación termal de Rancho Nuevo y del manantial de la hacienda Los Mezquites. Ambas muestras se analizaron por la técnica SWIR (Short Wave Infrared) con un espectrómetro LabSpec Pro Analytical Spectral Devices, con rango analítico de 1300-2500 nm, perteneciente al Instituto de Geofísica de la UNAM. También se utilizó una microsonda electrónica JEOL modelo JXA-8900R, perteneciente al Laboratorio Universitario de Petrología (LUP), también del Instituto de Geofísica de la UNAM.

Geotermometría

Uno de los más importantes geotermómetros utilizados en geotermia es el de sílice, particularmente cuando las temperaturas del reservorio son mayores a 150°C (Karingithi, 2009). Otros geotermómetros se basan en la proporción de cationes en cualquier especie acuosa, siempre y cuando exista equilibrio (Arnorsson y Svararsson, 1985). En este estudio se decidió utilizar el geotermómetro de Na-K de Giggenbach (1988) y geotermómetros de sílice para calcular la temperatura a profundidad del reservorio de la manifestación de Rancho Nuevo y del manantial de Los Mezquites.

Resultados

Parámetros de campo

Los resultados de los parámetros de campo de todos los pozos y manantiales se muestran en la Tabla 1. Todas las muestras presentan una temperatura mayor a la media anual que es de 21°C (INEGI, 2015), siendo la mínima de 32°C perteneciente al manantial de la hacienda Los Mezquites (GHM) y la máxima de 92°C que corresponde a la manifestación de Rancho Nuevo (GRN). El pH de las muestras oscila de 6.7 a 8.3, siendo la muestra GRN ligeramente más alcalina que las demás.

Respecto a la CE y STD, el sitio que presentó los valores más elevados es la muestra GHM, cuyos valores son 1382 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 913 mg/l, respectivamente. La muestra de la manifestación de Rancho Nuevo tuvo una CE de 1189 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y una concentración de STD de 785 mg/l. La muestra GRN tiene la más alta concentración de SiO_2 , con 205 mg/l, seguida de la muestra de Los Mezquites con 115 mg/l. Por otro lado, las únicas muestras con sulfuros fueron la GRN y la GHM, con valores de 0.74 mg/l y 0.11 mg/l, respectivamente.

Tabla 1. Parámetros medidos en campo.

Muestra	Temperatura (°C)	pH	CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	STD (mg/l)	SiO_2 (mg/l)	Sulfuros (mg/l)
GRN	92	8.3	1189	785	205	0.74
GHM	32	7.2	1382	913	115	0.11
GCOVE	56	6.8	1175	755	105	-
GRNPC	47	6.8	766	506	93	-
GRLMO	33	6.9	186	123	73	-
GRLMP	39	6.7	125	84	76	-
GRLMAP	58	7.0	183	183	74	-

Elementos mayores y traza

La cromatografía iónica y el análisis de titulación volumétrica de bicarbonatos arrojó valores confiables ya que el porcentaje de error del balance iónico de las muestras está por debajo de 5%. Únicamente dos muestras (GRNPC y GRLMO) presentaron un valor superior a 8%, lo cual las hace aceptables dentro del rango permitido (Hiscock y Bense, 2014). Los iones mayores predominantes en todas las muestras son el Na^+ y el HCO_3^- , como lo muestra la Tabla 2. Para ambos iones los valores más elevados los presenta la muestra de Los Mezquites seguida de la de Rancho Nuevo. El mismo caso se observa para los cloruros, fluoruros, litio, arsénico y boro, es decir estos elementos se encuentran en mayor concentración en las muestras de Rancho Nuevo y Hacienda Los Mezquites. Sin embargo, el Mg^{2+} , se encuentra en muy bajas concentraciones en ellas.

Tabla 2. Concentraciones de elementos mayores y menores en los pozos y manantiales muestreados.

	Li^+ (mg/l)	Na^+ (mg/l)	K^+ (mg/l)	Mg^{2+} (mg/l)	Ca^{2+} (mg/l)	F^- (mg/l)	Cl^- (mg/l)	SO_4^{2-} (mg/l)	HCO_3^- (mg/l)	B (mg/l)	As (mg/l)
GRN	2.4	420.1	39.1	0.04	0.8	13.9	280.0	126.9	506.0	10.5	0.30
GHM	3.0	473.7	38.5	1.2	21.5	11.7	275.0	113.3	717.1	10.6	0.34
GCOVE	1.5	308.9	23.6	26.0	90.4	0.9	252.5	105.2	655.1	3.8	0.00
GRNPC	0.7	154.9	26.2	35.9	75.5	0.4	19.3	13.0	682.0	2.9	0.00
GRLMO	0.06	38.3	9.4	3.9	14.7	0.9	6.5	7.6	176.1	0.1	0.00
GRLMP	0.03	29.5	7.4	1.8	6.9	0.8	3.1	3.4	104.7	0.1	0.00
GRLMAP	0.07	47.2	13.5	0.8	9.5	0.7	6.1	8.8	152.8	0.4	0.00

Con los resultados obtenidos de los análisis de iones mayores se definió, a partir del diagrama de Piper, el tipo de agua para cada sitio de muestreo. La mayoría de las aguas muestreadas, todas tomadas en pozos, son de tipo bicarbonatada-sódica. Sin embargo, las muestras pertenecientes a la manifestación termal de Rancho Nuevo y al manantial de la Hacienda Los Mezquites, se clasificaron como aguas bicarbonatadas-cloruradas-sódicas (Figura 2).

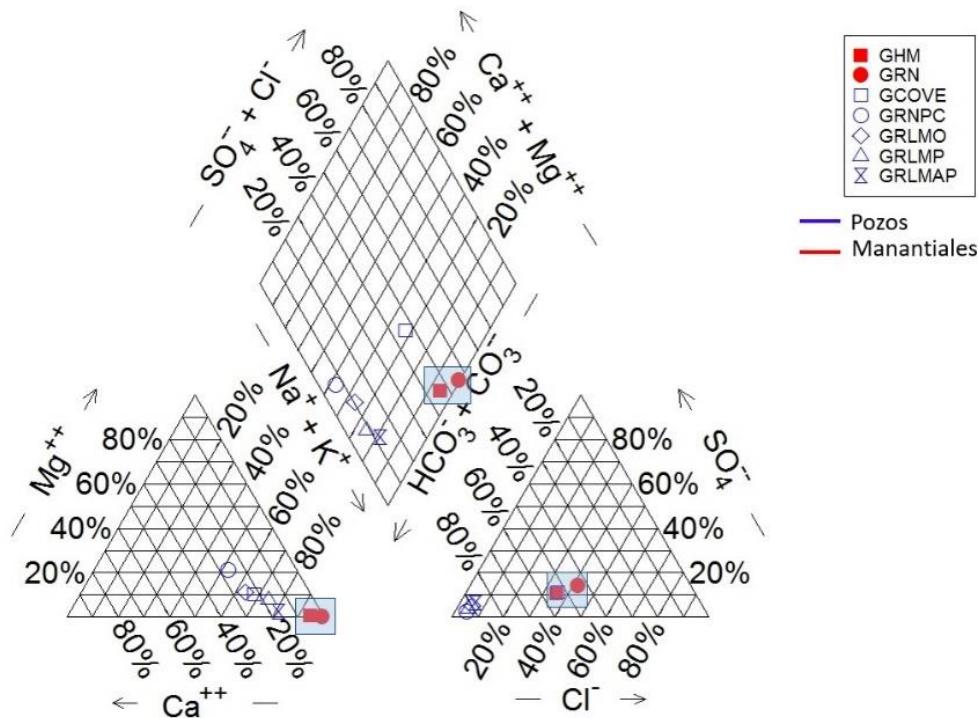


Figura 2. Tipos de agua obtenidas a partir del diagrama de Piper.

Por otro lado, a partir de los diagramas de Stiff se observa claramente que las concentraciones iónicas discrepan notablemente. Particularmente las muestras que se ubican en la localidad de La Machuca (cuya clave es GRLM) tienen una concentración notablemente inferior que aquellas que se ubican en Rancho Nuevo y alrededores (Figura 3).

Mineralogía

Con el SWIR se determinó la mineralogía de muestras de suelo de Rancho Nuevo y de la Hacienda Los Mezquites. Los espectros arrojados indican la presencia de ópalo y de montmorillonita en ambos sitios. Como complemento, con la microsonda electrónica se determinaron minerales característicos de ambientes hidrotermales presentes en ambas muestras de suelo. Tal es el caso de los sulfuros metálicos y de la barita. En ambos sitios de muestreo se identificó pirita (FeS_2) y barita (BaSO_4), pero en Rancho Nuevo también se encontró estibinita (Sb_2S_3) y en Los Mezquites arsenopirita (FeAsS) (Figura 4).

Geotermómetros

Los resultados de los geotermómetros calculados se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Temperaturas obtenidas de “Los Mezquites y Rancho Nuevo” con geotermómetros.

Geotermómetro	GHM (Los Mezquites) (°C)	GRN (Rancho Nuevo) (°C)
Calcedonia	119	164
Cuarzo conductivo	145	185
Cuarzo adiabático	139	172
Na-K (Giggenbach, 1988)	216	227

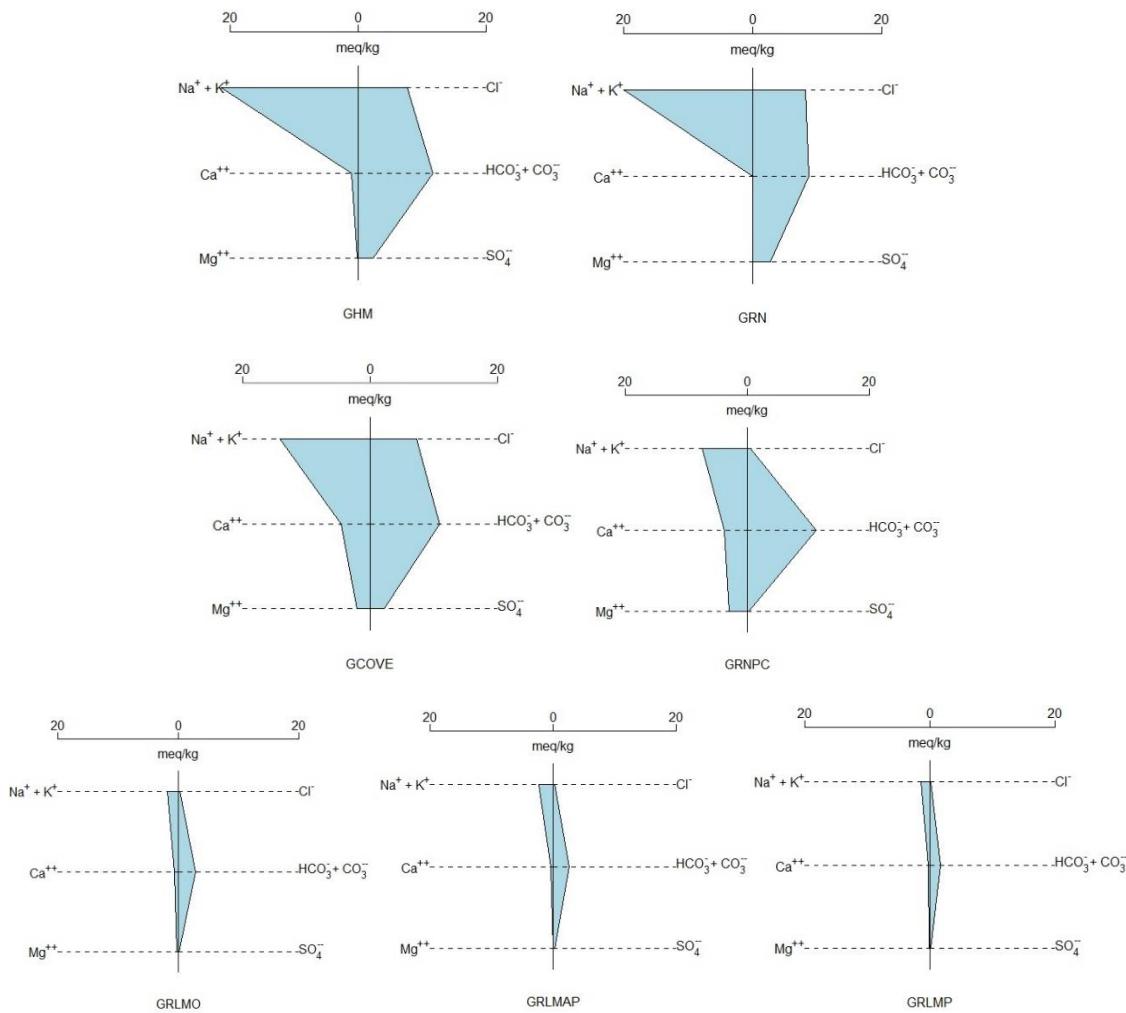


Figura 3. Diagramas de Stiff de las diversas muestras de agua.

Las temperaturas a profundidad calculadas para la manifestación de Rancho Nuevo según los geotermómetros de sílice, están por encima de los 160°C, y para el caso de Los Mezquites están entre 119 y 145°C. Para el caso del geotermómetro de Giggenbach (1988) se comprobó la existencia de equilibrio para ambas muestras (Figura 5). La temperatura estimada a profundidad para el sitio GRN y GHM usando dicho geotermómetro es de aproximadamente 227 y 216°C, respectivamente (ver Tabla 3).

Discusión

Los parámetros de campo evidencian que el comportamiento de las muestras de la manifestación de Rancho Nuevo y del manantial perteneciente a la Hacienda Los Mezquites es semejante. Ambas muestras presentan los valores más elevados medidos en campo, con excepción de la temperatura para el caso de la muestra GHM. Adicionalmente, también hay sulfuros en estas dos muestras, lo que no ocurre con las demás. Estos sulfuros son producto de alteración hidrotermal.

Las elevadas concentraciones de cloruros y STD de las muestras GRN y GHM con respecto a las demás, evidencian una circulación a profundidad y un flujo que puede ser intermedio o regional (Toth,

2005) con un pH que va de neutro a ligeramente alcalino. La concentración de bicarbonatos de las dos muestras puede ser producto de un proceso de mezcla con un acuífero frío con CO_2 disuelto y de baja salinidad, ocurrido durante el ascenso del fluido termal, provocando de esta manera una dilución, como se observa en el triángulo de aniones del diagrama de Piper (Figura 2).

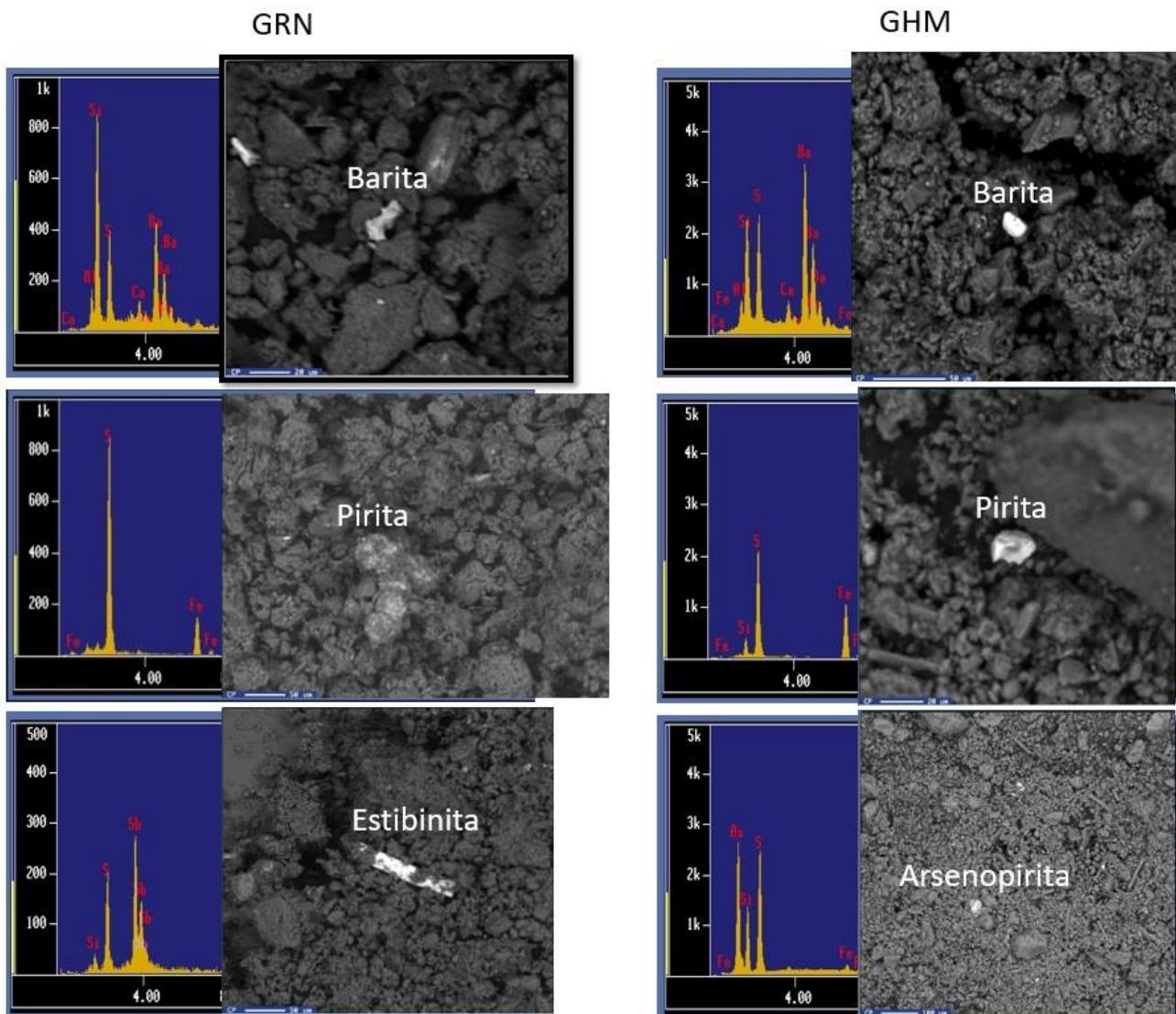


Figura 4. Minerales identificados con la microonda electrónica en las muestras de suelo GRN y GHM.

La composición química de iones mayores también es consistente con lo anterior, ya que en Rancho Nuevo y en la Hacienda Los Mezquites se presenta la mayor concentración iónica, como lo muestran los diagramas de Stiff (Figura 3). El tipo de agua en las muestras GRN y GHM es diferente a las demás, presentando una mayor concentración de HCO_3^- y Cl^- con enriquecimiento de As y F⁻, elementos originados de manera natural (Armienta et al., 2010; Estupiñan-Day et al., 2005), y que son característicos de ambientes termales (Webster y Nordstrom, 2003). Las altas concentraciones de arsénico de las muestras GRN Y GHM pueden ser producto de la lixiviación debida a la interacción entre el agua termal con la roca a profundidad (Ellis y Mahon, 1964; 1967; Webster y Nordstrom, 2003). El arsénico puede estar contenido como elemento traza en las rocas volcánicas de

composición ácida existentes en la zona de estudio.

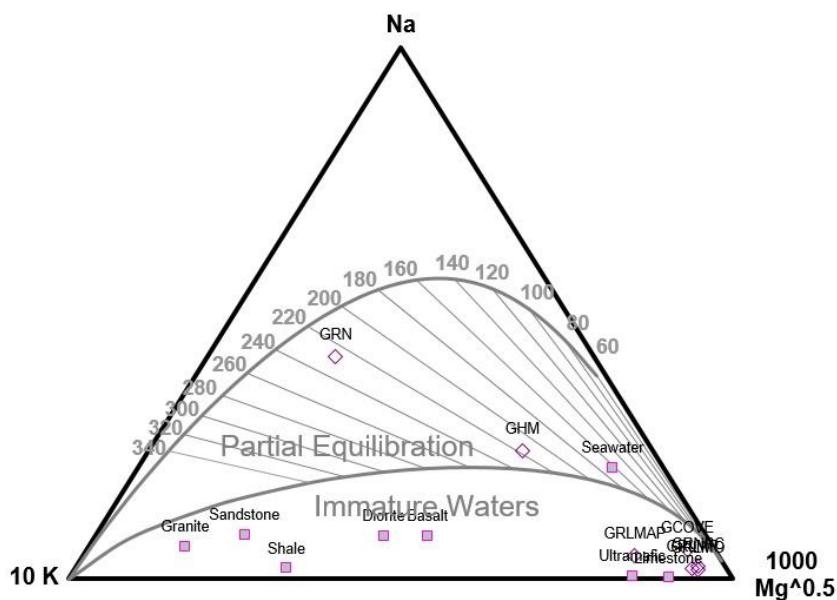


Figura 5. Diagrama ternario para determinar si existe equilibrio en las muestras de agua.

La presencia de boro y cloruros en la manifestación de Rancho Nuevo y el manantial de Los Mezquites también deben su alta concentración al mismo proceso de lixiviación de las rocas existentes en la zona de estudio, en este caso de las que tienen una composición basáltica y andesítica (Ellis y Mahon, 1977). Estos elementos son también considerados conservativos por su condición no reactiva, inerte e incompatible, ya que una vez que son adicionados al fluido, ahí permanecen (Arnórsson, 2000). Según Giggenbach (1991, 1992) el Cl y B en sus formas gaseosas HCl y H_3BO_3 , entran al sistema hidrotermal por contribución magmática, lo cual evidencian una circulación de fluido a profundidad.

La concentración de Mg^{2+} en aguas termales está estrechamente relacionado con la temperatura, es decir a mayor temperatura menor concentración, lo que se debe al equilibrio del agua termal con clorita o a la presencia de minerales que contienen magnesio (Ellis, 1971). Las muestras GRN y GHM tienen una menor concentración de Mg^{2+} con respecto a las otras muestras, lo que por tanto indica una mayor temperatura a profundidad. Esto se coincide con los resultados de los geotermómetros.

Las muestras de suelos de Rancho Nuevo y Los Mezquites presentan minerales producto de alteración hidrotermal, como los sulfuros metálicos encontrados en ambos sitios. Dado que los fluidos hidrotermales están subsaturados respecto a minerales de arsénico, es más probable que éste se disuelva de la roca (Ballantyne y Moore, 1988) y que posteriormente forme arsenopirita, como ocurre en Los Mezquites. Los otros minerales hidrotermales identificados en ambos sitios son ópalo (un polimorfo de sílice) y montmorillonita, ambos formados bajo condiciones de temperaturas de aproximadamente 100°C. La barita, encontrada tanto en GRN como en GHM, está presente en diversos ambientes geológicos, pero principalmente en ambientes de origen hidrotermal (Canic *et al.*, 2015; Dubé, 1988; Poole, 1988; Blount, 1977; Strübel, 1967). El bario tiene afinidad por rocas ígneas volcánicas, en particular por las potásicas (Yavuz *et al.*, 2002).

De acuerdo al diagrama ternario usado para el geotermómetro de Giggenbach (1988), se asume que

las muestras GRN y GHM se encuentran equilibradas (Figura 5), por lo que el geotermómetro es aplicable y fidedigno para ambos casos. Este geotermómetro funciona bien al aplicarse a aguas cloruradas, sin ser afectado por procesos de dilución o pérdida de vapor, como es el caso del manantial de Rancho Nuevo. De acuerdo a Marini (2000), este geotermómetro es útil para la evaluación de un re-equilibrio por procesos de mezcla, lo cual parece estar ocurriendo en el sistema de Rancho Nuevo.

También se calculó la temperatura con geotermómetros de calcedonia, cuarzo conductivo y adiabático. El resultado obtenido con el geotermómetro de calcedonia se descartó debido a que éste es confiable sólo para sistemas de baja temperatura, cuyo rango va de 100 a 120°C (Fournier, 1977). Por otro lado, el geotermómetro de cuarzo adiabático se emplea para descargas de pozos y manantiales con actividad burbujeante intensa. Su ecuación compensa las pérdidas de vapor causada por dicha actividad, así como el incremento en la concentración de sílice resultante (Fournier, 1977). Dado que GRN y GHM carecen de burbujeo intenso, tampoco se consideró confiable la temperatura obtenida con él. Por último, el geotermómetro de cuarzo conductivo se utiliza para manantiales a temperaturas de sub-ebullición y para aguas termales que se enfrian por conducción durante el ascenso. La temperatura del reservorio estimada con este geotermómetro, es la máxima basada en la solubilidad del cuarzo (Fournier, 1977) y la del último equilibrio. Para el caso de GRN que posee una temperatura poco menor a la de ebullición del agua, sin actividad intensa y que se asume que se ha enfriado durante el ascenso por la mezcla con un acuífero somero, se considera que de este es el geotermómetro de sílice que puede complementar el resultado del geotermómetro de Na-K.

Conclusiones

Las muestras GRN y GHM tienen mayor concentración de Cl^- , Na^+ , HCO_3^- , Li^+ y baja de Mg^{2+} con respecto a las muestras de pozos. Presentan también un enriquecimiento de arsénico y fluoruros, producto de la interacción de fluidos termales con rocas volcánicas existentes en la zona de estudio.

Se identificaron en la zona dos tipos de agua: bicarbonatada sódica para muestras tomadas de pozos y bicarbonatada clorurada sódica para las muestras de la manifestación de Rancho Nuevo (GRN) y de la hacienda Los Mezquites (GHM).

Existe un proceso de mezcla en las muestras GRN y GHM, es decir durante al ascenso del fluido termal, éste se encuentra con un acuífero somero y se mezcla, lo que provoca una dilución en las concentraciones iónicas del agua termal.

En los suelos de los sitios de Rancho Nuevo y Los Mezquites hay presencia de minerales de alteración hidrotermal (sulfuros metálicos).

Las muestras de GRN y GHM se encuentran en equilibrio parcial por lo que se justifica el uso del geotermómetro de Na-K para ambas, complementado por el geotermómetro de cuarzo conductivo. Se considera que el geotermómetro que puede ofrecer una temperatura de fondo más confiable para la muestra GRN es el de Na-K, mientras que para la muestra GHM consideramos que el geotermómetro idóneo para el cálculo de la temperatura del reservorio es el de cuarzo conductivo. De acuerdo a los resultados de los geotermómetros y a la clasificación de Axelsson y Gunnlaugsson (2000), la manifestación de Rancho Nuevo se considera un sistema de media a alta temperatura mientras que el manantial de Los Mezquites sería de baja a mediana temperatura.

Agradecimientos

Al Proyecto P02 titulado “Mapa de provincias geotérmicas a partir de la geoquímica de fluidos y distribución de acuíferos: herramienta para la exploración y desarrollo de recursos geotérmicos convencionales” del Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica CeMIE-Geo, por el financiamiento para llevar a cabo el trabajo de campo y análisis químico. A la Dra. Ruth Esther Villanueva Estrada por su apoyo incondicional, orientación y observaciones para la elaboración de este trabajo. Al Ing. Roberto Rocha Miller y al M.C. Augusto Rodríguez Díaz por su valioso apoyo tanto en campo como en gabinete. A la Dra. María Teresa de Jesús Rodríguez Salazar y al M.C. Ernesto Hernández Mendiola por la realización de los análisis químicos y por sus comentarios.

Bibliografía

- Aguirre-Díaz, G. and López-Martínez, M., 2001. The Amazcala caldera, Queretaro, Mexico: Geology and Geochronology. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 111, pp. 203-218.
- Aguirre-Díaz, G.J., y López-Martínez, M., 2003. La caldera de Apaseo, Guanajuato, Geología y geocronología de una nueva caldera en el sector central del Cinturón Volcánico Mexicano. GEOS, pp. 308.
- Armienta, M.A., Rodríguez, R., Segovia, N. y Montiel, M., 2010. Medical Geology in Mexico, Central America and the Caribbean. In: O. Selinus et al. (eds.), *Medical Geology, International Year of Planet Earth*, Springer Science Business Media B.V. pp. 59-78.
- Arnórsson, S. and Svavarsson, H., 1985. Application of chemical geothermometry to geothermal exploration and development. *Geothermal Resource Council Transactions*, Vol. 9. Part 1, pp. 293-298.
- Arnórsson, S., 2000. Reactive and conservative components. In: Arnórsson, S. (ed.), *Isotopic and chemical techniques in geothermal exploration, development and use. Sampling methods, data handling, and interpretation*. International Atomic Energy Agency, Vienna, pp. 200-211.
- Axelsson, G. and Gunnlaugsson, E., 2000. Long-term Monitoring of High- and Low-enthalpy Fields under Exploration. *Proceedings World Geothermal Congress 2000*, Kyushu Japan.
- Ballantyne, J.M. and Moore, J.N., 1988. Arsenic geochemistry in geothermal systems. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 52, pp. 475-483.
- Blount, C.W., 1977. Barite solubilities and thermodynamic quantities up to 300°C and 1400 bars, *Am. Mineral*, 62, pp. 942-957.
- Canic, T., Baur, S., Bergfeldt, T., and Kuhn, D., 2015. Influences on the Barite Precipitation from Geothermal Brines. *Proceedings World Geothermal Congress*, Melbourne, Australia, 19-25 April 2015.
- Diario Oficial de la Federación. Ley General de Cambio Climático. Cámara de diputados de la H. congreso de la Unión. 6 de junio del 2012. (Recuperado de <http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGCC.pdf>).

Dubé, T.E., 1988. Tectonic significance of Upper Devonian igneous rocks and bedded barite, Roberts Mountains allochthon, Nevada, USA. In: *Devonian of the world; Proceedings of the Second International Symposium on the Devonian System*, Volume II, Sedimentation: Canadian Society of Petroleum and Geologists Memoir 14, p. 235–249.

Eaton, A.D., Clesceri, L.S., and Greenberg, A.E. (Eds.), 1995. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 19th edición. American Public Health Association, American Water Works Association and the Water Environmental Federation.

Echegoyén-Sánchez, J., Romero-Martínez, S. y Velázquez-Silva, S., 1970. Geología y yacimientos minerales de la parte central del Distrito Minero de Guanajuato, México. *Boletín del Consejo de Recursos Naturales no Renovables* 75, pp. 1-36.

Ellis A.J., 1971. Magnesium ion concentrations in the presence of magnesium chlorite, calcite, carbon dioxide, quartz. *Amer. J. Sci.* 271, pp. 481-489.

Ellis, A.J. and Mahon, W.A.J., 1964. Natural hydrothermal systems and experimental hot-water/rock interactions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 28, pp. 1323-1357.

Ellis, A.J. and Mahon, W.A.J., 1967. Natural hydrothermal systems and experimental hot-water/rock interactions (Part II). *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 31, pp. 519-538.

Ellis, A.J. and Mahon, W.A.J., 1977. *Chemistry and geothermal systems*. Academic Press, New York, 392 p.

Estupiñán-Day, S., Vera, H., and Duchon, K., 2005. *Final Report “Task-Force Meeting” Defluoridation systems in Latin America and the Caribbean*, Washington DC, 22–24 October, 2004. Comisión Nacional del Agua, Secretaría de Salud de México, Panamerican Health Organization, WHO, Washington, DC.

Fournier, R.O., 1977. Chemical geothermometers and mixing models for geothermal systems. *Geothermics* 5, pp. 41-50.

Giggenbach W.F., 1988. Geothermal solute equilibria. Derivation of Na-K-Mg-Ca geoindicators. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 52, pp. 2749-2765.

Giggenbach, W., 1991. Chemical techniques in geothermal exploration. In Application of Geochemistry in Geothermal Reservoir Development. (F. D'Amore, co-ordinator), *UNITAR*, pp. 119-144.

Giggenbach W.F., 1992. The composition of gases in geothermal and volcanic systems as a function of tectonic setting. *Proc. 7th Int. Symp. Water-Rock Interaction*, Park City, Utah, pp. 873-878.

Iglesias, E.R., Torres, R.J., Martínez-Estrella, I. y Reyes-Picasso, N., 2011. Resumen de la evaluación 2010 de los recursos geotérmicos mexicanos de temperatura intermedia a baja. *Geotermia*, Vol. 24, No. 2.

INEGI, 2015: http://www.datatur.sectur.gob.mx/ITxER_Docs/GTO_ANUARIO_PDF15.pdf

Karingithi, C.W., 2009. Chemical Geothermometers for Geothermal Exploration. *IV Exploration for Geothermal Resources*, UNU-GTP, Lake Naivasha, Kenya, November, pp. 1-22.

Marini, L., 2000. *Geothermal techniques for the exploration and exploitation of geothermal energy*. Dipartimento per lo Studio del Territorio e delle sue Risorse, Università degli Studi di Genova.

Nieto-Samaniego, A.F., Alaniz-Álvarez, S.A., y Cerca-Martínez, M. 1999. *Carta geológico-minera Celaya*, escala 1:50,000: México, Consejo de Recursos Minerales, 1 mapa.

Poole, F.G., 1988, Stratiform barite in Paleozoic rocks of the Western United States. *Proceedings of the Seventh Quadrennial IAGOD Symposium*: Stuttgart, E. Schweizerbartsche Verlagsbuchhandlung, pp. 309–319.

Tóth, J., 2005. Las aguas subterráneas como agente geológico: causas, procesos y manifestaciones. *Boletín Geológico y Minero*, vol. 111, núm. 4, pp. 9-26.

Webster, J.G. and Nordstrom, D.K., 2003. Geothermal arsenic. In: Welch, A.H., Stollenwerk, K.G. (Eds.). *Arsenic in groundwater*. Kluwer Academic Publishers, Boston, MA, pp. 101-125.

Yavuz, F., Gültekin, A.H., Örgün, Y., Çelik, N., Çelik Karakaya, M., Karakaya, E., Sasmaz, A., 2002. Mineral chemistry of barium and titanium bearing biotites in calcalkaline volcanic rocks from the Mezitler area (Balıkesir-Dursunbey), western Turkey. *Geochemical Journal*, Vol. 36, pp. 563-580.