

COMPOSICION QUIMICA DE LAS AGUAS MINERALES SULFURADAS DE LA SIERRA DEL ROSARIO Y SU RELACION CON LA GEOLOGIA

J. R. Fagundo¹, P. González¹, R. Peláez², B. Peña¹, M. Suárez¹, C. Melián¹, J. Fagundo-Sierra¹.

¹. Centro Nacional de Termalismo "Víctor Santamarina" (CENTERVISA).

². Empresa Geólogo Minera de Pinar del Río.

RESUMEN

Se estudian las características químico - físicas y el origen de la composición química de las aguas minerales sulfuradas, correspondientes a 17 fuentes distribuidos en 11 yacimientos, mediante modelos de reconocimiento de patrones, balance de masas y mezcla de aguas. Las facies hidroquímicas presentes son numerosas: bicarbonatadas, sulfatadas, cálcicas, sódicas y mixtas. En el trabajo se clasifican, las aguas minerales desde el punto de vista hidroquímico y balneológico.

Esta composición de las aguas está controlada por las condiciones estructurales (fallas y mantos de sobrecorrimientos) y litológicas. El origen de la composición se explica mediante procesos geoquímicos complejos: disolución congruente de halita, yeso, calcita, dolomita y serpentinita; disolución incongruente de plagioclasa; oxidación de pirita; reducción de sulfato, generación o escape de CO₂ y precipitación de sílice.

Mediante relaciones de Eh - pH, determinadas a partir de ecuaciones termodinámicas correspondientes a los sistemas de equilibrios SO₄²⁻ - H₂S, SO₄²⁻ - HS⁻, SO₄²⁻ - FeS₂ y FeS₂ - H₂S a 25, 30 y 40 °C, se definen las zonas de estabilidad de cada especie sulfurada y la ubicación de los datos en las mismas.

Del estudio de las variaciones diaria y estacional del contenido de H₂S de un grupo de aguas minerales sulfuradas, así como las variaciones debida a la explotación continua de las mismas a un determinado caudal, se ponen de manifiesto diferencias en el comportamiento de los yacimientos estudiados: mientras en unas fuentes son poco apreciables las variaciones, en otras estos son significativos debido posiblemente a la mezcla con aguas más someras.

INTRODUCCION

Las aguas minerales sulfuradas constituyen uno de los tipos de aguas minero medicinales más importantes en las curas balneológicas, por el hecho de que su acción terapéutica abarca un amplio espectro y pueden ser administradas por todas las vías: oral, tópica e inhalatoria.

Estas aguas se caracterizan por contener más de 1 mg/l de azufre en forma de H₂S, HS⁻, polisulfuro, tiosulfato, etc. (Karakolev, 1984; San Martín y Armijo-Castro, 1994). Además de las acciones terapéuticas y farmacológicas relacionadas con los compuestos sulfurados, las aguas mineromedicinales sulfuradas suelen estar acompañadas de otros iones, tales como SO₄²⁻, Cl⁻, Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, así como componentes minoritarios: Rn, As, Fe, Cu, Co, Si, F, etc., los cuales le confieren otras propiedades beneficiosas en las curas balnearias.

En Cuba, las aguas minerales sulfuradas están muy distribuidas en todo el territorio, especialmente en la región centro occidental. Su formación está relacionada fundamentalmente con los procesos de oxidación - reducción de las piritas y en menor proporción con la disolución de yeso o anhidrita, a diferencia de lo que ocurre en otros países donde la fuente de los sulfuros y de los sulfatos de las aguas minerales procede de estos últimos minerales. En todos los casos las aguas

mineromedicinales sulfuradas de Cuba tienen un origen meteórico y las emergencias están asociadas a dislocaciones tectónicas locales.

En el presente trabajo se estudia la composición química de las aguas mineromedicinales de tipo sulfuradas de la Sierra del Rosario, el origen de esa composición, su clasificación desde el punto de vista hidroquímico y balneológico y su relación con las litologías que alimentan y almacenan dichas aguas, así como la variación diaria, estacional y debido a la explotación del yacimiento de la concentración de H₂S.

MATERIALES Y MÉTODOS

Con el objetivo de establecer, la ubicación de los yacimientos de aguas minero - medicinales sulfuradas estudiadas, en el marco de las regiones naturales y de las regiones hidrogeológicas correspondientes, se utilizaron las Unidades de los Paisajes del territorio de Cuba (Mateo y Acevedo, en: Nuevo Atlas Nacional de Cuba, 1988; Gutiérrez y Glean, 1999) y el esquema elaborado por Ergerov y Luge (1967) para la confección del Mapa Hidrogeológico de Cuba en escala 1:1000 000, respectivamente.

Se realizaron en el campo mediciones de temperatura, pH, potencial redox mediante pHmetro y medidor de temperatura y potencial redox (Eh) modelo HI-8424, marca HANNA Los contenidos de H₂S fueron también determinados “in situ” mediante las técnicas analíticas estándar (APHA, AWWA, WPCF, 1989). Los correspondientes datos aparecen en los trabajos publicados al respecto por en colectivo de CENTERVISA (González et al, 2000; 2001; Llerena, 2001).

Los datos fueron tomados a partir de la información de archivo (informe de exploración orientativa y detallada efectuadas por Peláez et al (1990), así como de los propios trabajos de investigación llevados a cabo por en colectivo de CENTERVISA (Tab. 1). La calidad de los mismos fue chequeada mediante balance de aniones y cationes y en ocasiones, por comparación entre la conductividad eléctrica real y teórica.

Para la clasificación de las aguas se utilizó el método hidroquímico de Kurlov y el basado en los grupos balneológicos (Karakolev, 1984; Romero, 2000). Con respecto a la temperatura se utilizó el criterio hidroterapéutico que toma como base la temperatura indiferente del cuerpo (Armijo-Valenzuela y San Martín, 1994) y con relación de pH, lo establecido en la Norma Cubana de Agua Mineral (NC: 93 – 01 – 218: 1995).

Los patrones hidrogeoquímicos fueron formulados a partir del tanto por diez de la concentración aniónica y catiónica expresada en meq/l y su fundamento se basa en modelos de reconocimiento de patrones (Fagundo, 1996), Los procesos geoquímicos que explican el origen de la composición química de las aguas fueron determinados mediante balance de masa y de mezcla de aguas (Fagundo-Sierra, 2000; Fagundo-Sierra et al, 2001).

El diagrama de estabilidad Eh – pH, fue elaborado a partir de ecuaciones deducidos a partir las energías libres de Gibbs y las relaciones formuladas por Drever (1982).

Para establecer la variabilidad de la composición química de las aguas, los datos fueron procesados mediante modelos estadísticos convencionales, determinándose los principales estadígrafos utilizados para estos fines (desviación estándar y coeficiente de variación).

Tabla 1. Propiedades físicas y químicas de las aguas minerales sulfuradas de la Sierra del Rosario.

No	T (°C)	PH	Eh (mv)	O ₂ (mg/l)	H ₂ S (mg/l)	TSS (mg/l)	HCO ₃ (mg/l)	Cl (mg/l)	SO ₄ (mg/l)	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	Na+K (mg/l)
1	27.0	7.02			10.0	1232	268.4	56.1	556.8	192.0	26.4	132.0
2	22.7	7.09	-365	2.0	198.9	1107	738.1	8.0	158.4	100.0	45.6	157.1
3	23.7	7.36	-317	1.0	21.6	1142	597.8	57.2	170.4	46.0	22.2	248.6
4	26.1	7.04	-238	0.6	8.1	760	359.9	27.9	165.6	98.0	13.2	95.2
5	36.0	7.15	-254	10	4.0	1055	304.6	31.8	709.0	326.7	36.0	32.6
6	36.0	7.40	-325	0.6-0.8	6.0	1407	283.2	17.6	1026.6	425.8	49.2	30.8
7	31.0	6.50			27.5	2662	213.0	43.0	1650.0	570.0	61.0	125.1
8	31.0	7.60	-317	1.0	38.5	1531	319.0	61.0	1220.0	504.0	57.0	76.0
9	30.0	8.90			23.9	1189	592.8	97.3	120.5	2.4	13.4	362.5
10	25.0	7.65			1.0	1128	174.0	73.1	558.0	250.0	32.0	41.1
11	25.0	7.50			87.0	1882	1052.0	250.0	54.0	81.0	27.0	499.0
12	30.0	7.50			1.5	446	370.0	9.0	22.0	84.0	20.0	25.0
13	27.0	7.00	-290	3.0	15.00	520	384.0	69.0	23.0	97.9	31.0	23.0
14	27.1	7.23	-248		7.8	470	311.2	22.7	19.2	76.1	14.6	26.2
15	27.0	6.88	-235		8.6	573	390.4	24.9	19.2	96.0	21.6	20.7
16	24.8	7.30	-260		10.0	686	457.6	43.3	9.6	123.3	12.6	39.5
17	25.0	6.85			10.0	759	439.3	52.5	71.1	147.0	17.1	32.7

Yacimiento Cueva Portales: 1- M. Cueva de los Portales; yacimiento El Sitio: 2- Pozo P-55; yacimiento Mil Cumbres: 3- M. Sulfuroso; yacimiento Cacarajicara: 4- M. Azufre; yacimiento San Diego de los Baños: 5- M. El Templado, 6- M. La Gallina, 7- Pozo P-1; yacimiento Los Bermejales: 8- Manantial M-1, 9- Pozo P-4; yacimiento Sal y Cruz: 10- M. Azufre; yacimiento Rancho Mar: 11- M. Rancho Mar; yacimiento Pozo Azul: 12- Pozo Azul; yacimiento Soroa: 13- M. Cercano al Balneario; yacimiento Las Terrazas: 14- M. Pozo Brocal, 15- M. San Juan Sulfuroso; yacimiento Cayajabos: 16- M. Pedernales, 17- M. La Pastora.

CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS DE LA REGIÓN

En la región natural Montañas de la Sierra del Rosario fueron estudiados numerosos yacimientos y manifestaciones de aguas minerales sulfuradas. Esta región se encuentra ubicada en el sector centro-oriental de la provincia de Pinar del Río y se corresponde con la subregión hidrogeológica San Diego – Artemisa (Tab. 1). Su geología se caracteriza por una complejidad litológica y estructural, como consecuencia del desplazamiento y transporte tectónico de rocas ocurrido durante el Eoceno medio literatura (Pszczoikowski, 1978; Academia de Ciencias de Cuba, 1988). Los sedimentos carbonatados acuíferos de la Fm. Artemisa (Jurásico superior Cretácico inferior) se encuentran intercalados con sedimentos impermeables de tipo efusivo sedimentario, ultrabásico y esquistos arenosos pizarrosos de las formaciones San Cayetano (Jurásico Superior) y Manacas (Paleógeno).

Las aguas minerales están asociadas principalmente a las rocas de la Fm. Artemisa. Constituyen el drenaje profundo del macizo, desarrollado por lo general, en condiciones de confinamiento entre secuencias impermeables.

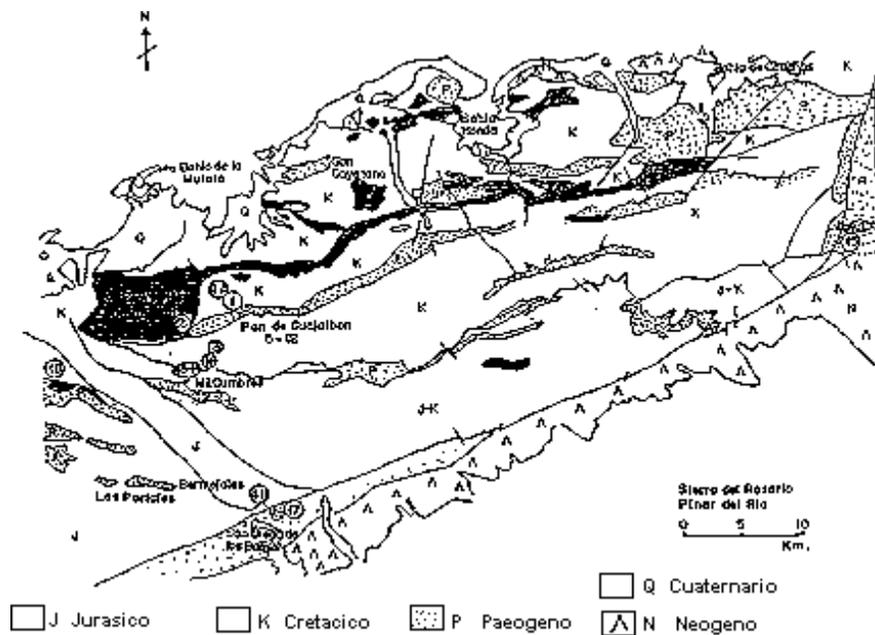


Figura 1. Esquema geológico de la Sierra del Rosario

En la Sierra del Rosario han sido descritas las siguientes formaciones:

- Sistema Jurásico. Constituido por la Formación Artemisa. Está integrada por calizas masivas y de estratos gruesos con intercalaciones de aleurolitas y areniscas.
- Sistema Cretácico. Constituido por las formaciones Bahía Honda, Lucas, Guajaibón, Chiquita, Encrucijada y Quiñones. La Formación Bahía Honda está representada por sedimentos de tipo efusivo- sedimentarios, donde aparecen diabasas, basaltos, porfiritas y tobas. Los estratos de la Formación Lucas están formados por calizas laminadas de grano fino con intercalaciones de

areniscas, aleurolitas. La Formación Guajaibón está constituida por calizas masivas muy puras con intercalaciones de bauxitas. En las grietas se observa asfalto, petróleo líquido y en algunas ocasiones procesos de piritización. Las formaciones Chiquita (Cacarajícara) y Quiñones están constituidas fundamentalmente por conglomerados polimícticos donde aparecen pedernales, aleurolitas, argilitas, areniscas, calizas, calcarenitas y gravelitas. La Formación Encrucijada presenta lavas basálticas, andesíticas, silicitas, calizas, argilitas y aleurolitas.

- Sistema Paleógeno. Constituido por las formaciones Manacas y Capdevila. La Formación Manacas está integrada por olistostromas polimícticos, esquistos, areniscas y pedernales. La Formación Capdevila la constituyen areniscas, conglomerados y aleurolitas. Además afloran sedimentos del Cuaternario representados por depósitos preluviales, deluviales y aluviales de constitución areno-arcillosa.

En la tabla 2 se muestra un diagrama esquemático de las principales litologías presentes en la Sierra del Rosario y parte de la Sierra de los órganos, asociadas a los manantiales sulfurados estudiados.

Tabla 2. Formaciones geológicas y litología de las regiones relacionadas con los yacimientos de aguas minerales sulfuradas.

No	Edad (Símbolo)	Formación	Composición	Yacimiento
1	Paleógeno - Eoceno (P ₁₋₂)	Pica Pica (Manacas)	Areniscas, esquistos, calizas, pedernales y olistostromas	
2	Cretácio superior Maestrichtiano (K _{2m})	Cascarajicara	Brechas, calcarenitas, calcilutitas	
3	Cretácico inferior y superior (K ₁₋₂)	Sierra Azul	Calizas, calizas margosas, argilitas, silicitas	Cacarajicara
4	Cretácico inferior Aptiano-Albiano (K _{1a-al})	Encrucijada (Sábalo)	Lavas basálticas, andesíticas, silicitas, argilitas, aleurolitas	
5	Cretácico inferior Valanginiano-Albiano (K _{1 v-al})	Polier	Calizas bituminosas, areniscas cuarzosas, argilitas	
6	Cretácico inferior Berriasiano-Barremiano (K _{1b-bm})	Lucas	Calizas (biomicritas) estratificadas, argilitas calcáreas.	
7	Jurásico superior- Cretácico inferior (J ₃ -K ₁)	Artemisa (Francisco)	Calizas estratificadas (micritas, biomicritas, calcilutitas y calcarenitas) con intercalaciones de silicitas en la parte superior	El Sitio Mil Cumbres Bermejales San Diego de los Baños Sal y Cruz Pozo Azul Rancho Mar Soroa Las Terrazas Cayajabos
8	Jurásico superior Oxfordiano – Tithoniano (J _{3 ox-t})	Guasasa (m San Vicente)	Calizas masivas, calcarenitas, calciruditas calcáreas fosilíferas	Cueva Portales

REGIONALIZACION Y CARACTERIZACION DE LOS RECURSOS

Las muestras seleccionadas en este trabajo corresponden a 17 fuentes representativas, las cuales se encuentran ubicadas en 11 yacimientos, distribuidos en 1 región natural la cual se corresponde con 1 región hidrogeológica, tal como se aprecia en la tabla 2.

Tabla 2. Regiones Naturales y Regiones Hidrogeológicas donde se encuentran los yacimientos de aguas minerales sulfuradas de la Sierra del Rosario.

Región natural	Región Hidrogeológica	Yacimiento
<u>Subprovincia:</u> Cuba Occidental <u>Distrito:</u> Pinar del Río Subdistrito: Montañas de la Cordillera de Guaniguanico <u>Región natural:</u> Montaña de la Sierra del Rosario	<u>Subregión:</u> San Diego - Artemisa	1. El Sitio 2. Mil Cumbres 3. Cacarajícara 4. San Diego de los Baños 5. Los Bermejales 6. Sal y Cruz 7. Rancho Mar 8. Pozo Azul 9. Soroa 10. Las Terraza 11. Cayajabos

Yacimiento Cueva de los Portales

El yacimiento se localiza en el municipio La Palma, en el lugar conocido con el mismo nombre, en el límite entre la Sierra de los Órganos y la Sierra del Rosario. Las coordenadas de su centro son: X: 245 200, Y: 317 700.

En este sitio brota una fuente de aguas minerales, que se encuentra ubicada en las cercanías de la Cueva de los Portales, cuyas aguas se originan por intemperismo de las calizas del miembro San Vicente de la Fm. Guasasa (Jurásico medio). En la región afloran también sedimentos del Paleógeno, constituidos por areniscas, esquistos y calizas de la Fm. Manacas (Paleógeno), así como sedimentos de la Fm. San Cayetano del Jurásico inferior. (Nuevo Atlas Nacional de Cuba, 1988).

Las aguas clasifican como minerales, hipotermales, sulfuradas sulfatadas bicarbonatadas mixtas, con reacción alcalina. Los métodos de reconocimiento de patrones hidrogeoquímicos muestran la siguiente relación para las aguas del sector: 361 – 167 (Fig. 2; Tab. 3). La composición química de estas aguas, de acuerdo al modelo de balance de masa se explica mediante los siguientes procesos geoquímicos: disolución congruente de halita, calcita y dolomita, disolución incongruente de albita, oxidación de pirita y reducción de sulfato.

Tabla 3. Clasificación hidroquímica, patrón hidrogeoquímico y clasificación balneológica de las aguas de la Sierra del Rosario

No	Clasificación hidroquímica	Patrón hidrogeoquímico	Clasificación
1	SO ₄ >HCO ₃ -Ca>Mg	361-167	Hipotermal, sulfurada sulfatada bicarbonatada mixta, con reacción alcalina
2	HCO ₃ >SO ₄ -Na>Ca>Mg	433-181	Hipotermal, sulfurada bicarbonatadas sulfatadas mixtas, con reacción neutra
3	HCO ₃ -Na	721-172	Hipotermal, sulfurada bicarbonatadas sódicas, con reacción alcalina
4	HCO ₃ >SO ₄ -Ca>Na	451-163	Hipotermal, sulfurada mixta, con reacción neutra
5	SO ₄ >HCO ₃ -Ca	271-127	Mesotermal, sulfurada bicarbonatada cálcica, fluorada, con reacción neutra
6	SO ₄ -Ca	181-118	Mesotermal, sulfurada sulfatada cálcica, con reacción alcalina
7	SO ₄ -Ca	181-118	Hipotermal, sulfurada sulfatada cálcica, con reacción neutra
8	SO ₄ -Ca	217-118	Hipotermal, sulfurada sulfatada cálcica, con reacción alcalina
9	HCO ₃ -Na	811-118	Hipotermiales, bicarbonatada sódica, con reacción alcalina
10	SO ₄ -Ca	172-127	Hipotermal, sulfurada sulfatada cálcica, con reacción alcalina
11	HCO ₃ >Cl-Na	811-271	Hipotermal, bicarbonatada, clorurada sódica, con reacción alcalina
12	HCO ₃ -Ca>Mg	163-181	Hipotermal, sulfurada mixta, con reacción alcalina
13	HCO ₃ >Cl-Ca>Mg	163-217	Hipotermal, sulfurada mixta, con reacción alcalina
14	HCO ₃ -Ca	181-181	Hipotermal, sulfurada cálcica, con reacción neutra
15	HCO ₃ -Ca	181-181	Hipotermal, sulfurada cálcica, con reacción neutra
16	HCO ₃ -Ca	181-181	Hipotermal, sulfurada cálcica, con reacción neutra
17	HCO ₃ -Ca	181-181	Hipotermal, sulfurada cálcica, con reacción neutra

1- M. Cueva de los Portales; 2- Pozo P-55; 3- M. Sulfuroso; 4- M. Azufre; 5- M. El Templado, 6- M. La Gallina, 7- Pozo P-1; 8- Manantial M-1, 9- Pozo P-4; 10- M. Azufre; 11- M. Rancho Mar; 12- Pozo Azul; 13- M. Cercano al Balneario Soroa; 14- M. Pozo Brocal, 15- M. San Juan Sulfuroso; 16- M. Pedernales, 17- M. La Pastora.

Yacimiento El Sitio

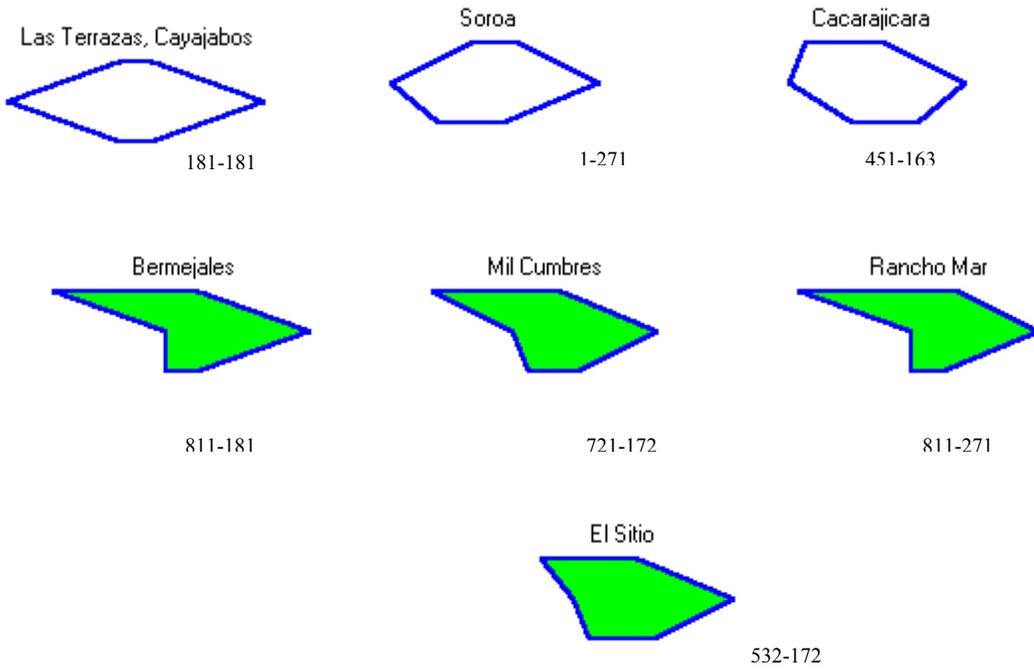
El yacimiento está ubicado en el municipio La Palma, muy cerca del poblado El Sitio junto a la carretera que comunica este asentamiento poblacional con el área protegida Mil Cumbres, a 5 km. del Centro Turístico la Ciguaraya. Las coordenadas de su centro son: X: 241 850, Y: 325 500.

En este lugar fue perforado un pozo (P - 55) durante los trabajos de búsqueda geológica con características artesianas a partir de una profundidad de 340 m, debido a las características de confinamiento del acuífero. Sus aguas clasifican como: minerales hipotermiales, sulfuradas bicarbonatadas sulfatadas mixtas, con reacción neutra.

La composición química de las aguas corresponde al patrón hidroquímico 532 -181 (Fig. 2; Tab. 3). El origen de la composición química de estas aguas, determinado mediante balance de masa, se explica por procesos de disolución incongruente de plagioclasas (anorthita y albita), acompañados de procesos de oxidación de pirita y reducción parcial de sulfato (Fagundo et al, 2000a). Tales procesos se justifican por la presencia de minerales de tipo básico y ultrabásico en los sedimentos que forman parte de la cobertura confinante del acuífero. Los minerales de tipo aluminosilicato, son más solubles a temperaturas altas (propias de los drenajes profundos) y a bajos o altos valores de pH (Appelo y Postma, 1993).

Na+K	_____	Cl
Ca	_____	HCO ₃ +CO ₃
Mg	_____	SO ₄

Bicarbonatadas



Sulfatadas

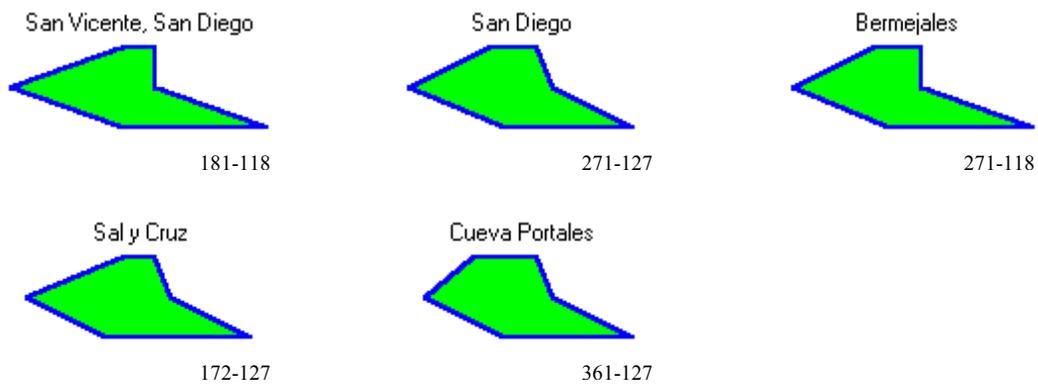


Figura 2. Patrones hidrogeoquímicos de las aguas minerales sulfuradas de la Sierra del Rosario

Yacimiento Mil Cumbres

El yacimiento se localiza en el municipio La Palma, dentro del Área Protegida Mil Cumbres. Las coordenadas de su centro son: X: 254 700, Y: 326 850.

El yacimiento se asocia al complejo acuífero en los depósitos del Jurásico Superior y Cretácico inferior, de la Fm Artemisa. Predominan aquí las aguas de fisuras, grietas y fallas. El grado de acuosidad es muy irregular y depende de la magnitud del tectonismo del corte geológico. En el centro del sector se localiza un manantial con un caudal aproximado de 1 l/s, el cual es muy posible que ascienda por algunas estructura tectónicas mezclándose con aguas menos profundas en la parte superior del corte geológico (Dirección Provincial de Planificación y Empresa Geólogo Minera del MINBAS, 1998).

La composición química de estas aguas (Fig. 2; Tab. 3) corresponde al patrón hidroquímico de tipo 721 - 172 (aguas bicarbonatadas sódicas). Clasifican como minerales hipotemales, sulfuradas bicarbonatadas sódicas, con reacción alcalina. El origen de la composición puede explicarse, por la ocurrencia fundamentalmente de procesos geoquímicos de disolución congruente de halita y serpentina, disolución incongruente de plagioclasas (albita y anorthita), oxidación de pirita y reducción de sulfato.

Yacimiento Cacarajícara

El yacimiento se localiza en el municipio Bahía Honda, en las márgenes de río Las Pozas, al este de Rancho Lucas. Las coordenadas del centro son: X: 268 000, Y: 335 000. En la constitución geológica de la región figuran depósitos carbonatados y terrígenos de la Fm. Cacarajícara Sierra Azul y Lucas, constituidos principalmente por calizas, argilitas, brechas, calcarenitas y calcilutitas (Academia de Ciencias de Cuba, 1989).

La aguas del sector están asociadas al drenaje profundo del carso, las mismas emergen a la superficie a través de varios manantiales. Sus aguas son de tipo bicarbonatadas cálcicas y mixtas, uno de los manantiales posee además sulfuros. Clasifican como minerales hipotemales, sulfuradas mixtas, con reacción neutra. El patrón hidroquímico de estas aguas es de tipo 451 – 163 (Fig. 2; Tab. 3). La composición química de las mismas puede explicarse mediante los siguientes procesos geoquímicos: disolución congruente de halita, calcita y dolomita, disolución incongruente de plagioclasa (albita), así como oxidación de pirita, con reducción parcial de sulfato (Peña, 2000).

Yacimiento San Diego de los Baños

El yacimiento se localiza en el municipio Los Palacios en el mismo pueblo San Diego de los Baños, en las márgenes del río San Diego o Caiguanabo. Las coordenadas de su centro son X: 256 150, Y: 314 900. Las aguas de este sector están asociadas a las calizas agrietadas y carsificadas de la Fm. Artemisa que afloran en el área del yacimiento y se vinculan más directamente al nudo de fallas conformado por la intersección de la falla Pinar con la falla San Diego de los Baños (Peláez et al, 1990).

En este yacimiento se encuentra ubicado en el balneario del mismo nombre, de mayor tradición en el país en curas balneológicas. El desarrollo del asentamiento poblacional en esa zona se debe precisamente a la existencia de esas aguas. El entorno cuenta dentro del poblado con una

infraestructura hotelera y extrahotelera para el servicio al turismo de salud. A 4 km de este sector se encuentra el Centro Turístico “La Güira”.

Se explotan en la actualidad tres manantiales denominados: El Tigre, El Templado y La Gallina con caudales, según Ergerov y Luge del orden de 1 l/s. Peláez et al (1990), reportan que los caudales en El Tigre y El Templado varían entre 9 y 10 l/s y en La Gallina entre 0.6 y 0.8 l/s. En Alvarez-Nodarse y Moreno (1998) se consigna un caudal total de 15 l/s. También existen varios pozos (P1, P 16 – P 19, etc.), los cuales fueron perforados en el marco de los trabajos geológicos realizados en esta área.

Existen básicamente dos tipos de aguas minerales: mesotermales, sulfuradas sulfatadas bicarbonatadas cálcicas, fluoradas, ligeramente radónicas, de reacción neutra (manantiales El Tigre y El Templado) y minerales mesotermales, sulfuradas sulfatadas cálcicas, fluoradas, ligeramente radónicas, de reacción alcalina (manantial La Gallina) o ácida (Pozo P 1).

Los patrones hidrogeoquímicos de los manantiales El Templado, a Gallina y el Pozo P 1 son de tipo 271-127, 181-118 y 181-118 respectivamente (Fig. 2; Tab. 3). La composición química se explica por disolución de calcita, dolomita y albita, oxidación de pirita y reducción parcial de sulfato, así como de mezcla de aguas de diferente naturaleza (en distintas proporciones) presentes en el yacimiento (Fagundo et al, 2001).

Yacimiento Los Bermejales

El sector se localiza en el municipio Los Palacios, en el lugar conocido como Baños de Los Bermejales, en las márgenes del río San Diego, a 20 km del Centro Turístico La Güira. Las coordenadas de su centro son: X: 250 500, Y: 318 150. Las aguas minerales están asociadas a las calizas agrietadas y carsificadas de la Fm. Artemisa y surgen a la superficie del terreno en forma de manantiales ascendentes, aprovechando para ello zonas tectónicas de mayor permeabilidad.

En este sitio alumbran varios manantiales en los márgenes y en el cauce del río Caiguanabo, al igual que en el yacimiento de San Diego de los Baños y fueron perforados varios pozos durante los trabajos geológicos (Peláez et al, 1990). No existe aquí una instalación balneológica, pero acuden al lugar numerosas personas que viven en poblados y caseríos cercanos, los cuales se alojan en casas construidas para el estacionamiento temporal. El caudal de su principal manantial es de 1 l/s.

Entre las fuentes más interesantes se pueden citar el manantial M 1 y el Pozo P 4, cuyas aguas clasifican como minerales hipotermales, sulfuradas sulfatadas cálcicas, con reacción alcalina y como aguas minerales hipotermales, sulfuradas, bicarbonatadas sódicas, de reacción alcalina respectivamente.

Los patrones hidrogeoquímicos de estas aguas son de los tipos 271-118 y 811-118 respectivamente. En el caso del manantial M 1, origen de la composición química viene dado por procesos geoquímico similares a los que ocurren en el sector San Diego de los Baños, mientras que en el caso del pozo P 4, estos procesos son: disolución de halita, disolución congruente de serpentina, disolución incongruente de plagioclasas (albita, microclino y anorthita), reducción de sulfato, oxidación de pirita, precipitación de cuarzo y) generación biogénica de CO₂ (Fagundo et al, 2002).

Yacimiento Sal y Cruz

Este yacimiento se encuentra ubicado en el municipio de San Cristóbal, al noroeste de ese pueblo y a 5km del caserío de Francisco, en la margen derecha del río del mismo nombre. Sus Coordenadas

aproximadas: X: 284 000, Y: 328 200. En este lugar existe un manantial denominado Azufre de Sal y Cruz que se ha utilizado con fines terapéuticos. Hace cerca de cien años se estableció allí una especie de balneario rústico con unas 20 casas de guano para los temporadistas.

La composición química de las aguas es algo parecida a la de San Diego de los Baños (patrón hidrogeoquímico 172-127), tal como se muestra en la figura 2 (Tab. 3), pero el contenido de H₂S es mucho más bajo. En determinados períodos relacionados a grandes precipitaciones en el área, según manifiestan los campesinos, *revienta el manantial* y se siente un fuerte olor a sulfhídrico (Embil y Trelles, 1947). Estas aguas clasifican como minerales hipotermales, sulfuradas sulfatadas cálcicas, de reacción alcalina.

Yacimiento Pozo Azul

El sector se ubica en el municipio San Cristóbal, en las márgenes del río homónimo, en el lugar conocido con nombre del yacimiento (Pozo Azul). Se encuentra muy próximo a la presa La Paila específicamente en el valle del río San Cristóbal dentro del macizo montañoso. Las coordenadas de su centro son: X: 287 700, Y: 328 250. En la actualidad no tiene acceso, los asentamientos poblacionales más próximos son la comunidad rural Modesto Serrano y el núcleo urbano San Cristóbal.

En el sector alumbran tres manantiales ascendentes con un caudal total aproximado a los 2 l/s (Dirección Provincial de Planificación y Empresa Geólogo Minera del MINBAS, 1998). Las aguas se asocian al complejo acuífero de la Fm. Artemisa, caracterizado por la presencia de aguas de fisura y grietas en zonas tectónicas. Clasifican como: Aguas minerales, hipotermales, sulfuradas mixtas, con reacción alcalina.

La composición de las aguas corresponde al patrón hidroquímico 163 – 181 (Fig. 2; Tab. 3). La composición química de estas aguas se explica, principalmente por los procesos de disolución congruente de calcita y dolomita, disolución incongruente de plagioclasa (albita), así como procesos de oxidación de pirita y reducción parcial de sulfato (Peña, 2000).

Yacimiento Rancho Mar

El yacimiento está ubicado en el municipio San Cristóbal en el lugar que tiene el mismo nombre que aquel (Rancho Mar). Este yacimiento se encuentra en el centro de la Sierra del Rosario, en las cercanías del cruce entre la carretera de montaña y la carretera Norte-Sur que vincula a San Cristóbal con Bahía Honda. Son las coordenadas de su centro: X: 282 860, Y: 333 570.

En este yacimiento existe un manantial de agua mineromedicinal. El caudal aproximado del mismo es de 2 l/s (Dirección Provincial de Planificación y Empresa Geólogo Minera del MINBAS, 1948). Las mismas clasifican como minerales hipotermales, bicarbonatadas cloruradas sódicas, de reacción alcalina.

La composición química de las aguas corresponde al patrón de tipo 811 – 271 (Fig. 2; Tab. 3). Dicha composición puede explicarse, fundamentalmente, a partir de los siguientes procesos geoquímicos: disolución congruente de halita y serpentina, disolución incongruente de plagioclasas (albita y anorthita), oxidación de pirita y reducción parcial de sulfato (Peña, 2000).

Yacimiento Soroa

El yacimiento se localiza en el municipio Candelaria, dentro de la Villa Turística Soroa. Está enclavado en el valle del río Manantiales. Las coordenadas de su centro son: X: 293 850, Y: 330 800. Las aguas del sector están asociadas tanto al complejo acuífero de las calizas de la Fm.

Artemisa como a las rocas ultrabásicas de la Fm. Sábalo. En el área se manifiestan tres manantiales ascendentes con un gasto total aproximado a los 3 l/s constante durante todo el año según observaciones aisladas (Dirección Provincial de Planificación y Empresa Geólogo Minera del MINBAS, 1998).

La composición química de las aguas corresponde al patrón hidroquímico 163 – 271 (Fig. 2; Tab. 3). Las mismas clasifican como minerales, hipotermales, sulfuradas mixtas, con reacción neutra. La citada composición es explicada mediante los siguientes procesos: disolución congruente de halita, calcita y dolomita, disolución incongruente de plagioclasa (albita), así como oxidación de pirita con reducción parcial de sulfatos.

Yacimiento Las Terrazas

El yacimiento se localiza en el municipio La Palma, en las márgenes del río San Juan, dentro del área de desarrollo del centro turístico Las Terrazas, en la parte noreste de la Sierra del Rosario. Las coordenadas de su centro son: X: 301 000, Y: 337 000. Las aguas del yacimiento se alimentan de las precipitaciones que drenan los macizos carbonatados. Estas aguas emergen en el contacto con fallas paralelas y transversales a la Falla Pinar.

La composición química de las aguas corresponde al patrón hidroquímico de tipo 181 – 181 (Fig. 2; Tab. 3). Dichas aguas clasifican como minerales, hipotermales, sulfuradas cálcicas, con reacción neutra. Su composición química se explica mediante los siguientes procesos geoquímicos: disolución congruente de calcita y dolomita, oxidación de pirita y reducción de sulfato (Peña, 2000).

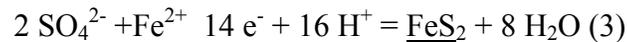
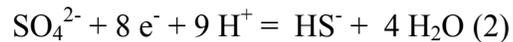
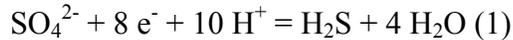
Yacimiento Cayajabos

El yacimiento se localiza al oeste del poblado de Cayajabos y está representado por varios manantiales (Pedernales y La Pastora) y pozos (Pedernales), cuyas aguas, de composición bicarbonatada cálcica, poseen relativamente altos contenidos de sulfuro de hidrógeno. Las coordenadas correspondientes son: Pedernales X: 340 000, Y: 337 000; La Pastora X: 345 000, Y: 338 000. Las aguas se originan por infiltración de las precipitaciones a través de los sedimentos carbonatados de la Fm. Artemisa (Jurásico superior Cretácico inferior) y su emisión está relacionada con las fallas secundarias perpendiculares a la falla Pinar, presentes en este sitio.

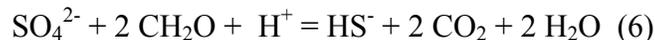
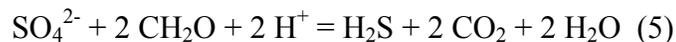
El patrón hidrogeoquímico es de tipo 181 – 181 (Fig. 2; Tab. 3). Las mismas clasifican como minerales, hipotermales, sulfuradas cálcicas, con reacción neutra. Los cálculos del balance de masa, que explican la composición química de las aguas del manantial La Pastora ofrecen la información de que los procesos vinculados al origen de la composición química de sus aguas son: disolución congruente de halita, calcita y dolomita, oxidación de pirita y reducción de sulfato (Fagundo et al, 2000b). Estos procesos son coherentes con la composición mineralógica de los sedimentos de la Formación Artemisa.

PROCESOS GEOQUIMICOS FORMADORES DE SULFUROS

La formación de sulfuros en el medio acuático procede de la reducción de los sulfatos. Este proceso se produce muy lentamente en ausencia de bacterias, mientras que en presencia de las mismas la reacción ocurre con rapidez. Las expresiones termodinámicas correspondientes (Drever, 1982) son las siguientes:

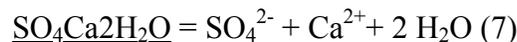


En presencia de materia orgánica (CH_2O), de la cual se nutren las bacterias, las dos primeras ecuaciones quedan como:



Las bacterias que catalizan estas reacciones son de tipo anaeróbica, ya que las mismas se producen en un medio escaso en oxígeno disuelto. Se ha reportado la presencia, tanto en los acuíferos como en los sedimentos marinos, de bacterias de los géneros *Sporovibrio desulfuricans*, *Desulfovibrio desulfuricans*, *Thiobacillus ferroxidans*, entre otras (Bitton, 1994). El oxígeno puede ser aportado por las precipitaciones y llegar al acuífero a través de las grietas del terreno o tomado de compuestos oxigenados, tales como los nitratos, nitritos, fosfatos, la propia materia orgánica y otras sustancias presentes en los sedimentos (Appelo y Postma, 1993).

La fuente de SO_4^{2-} en los acuíferos costeros procede del agua marina, mientras que en acuíferos no litorales puede proceder de minerales evaporíticos (yeso y anhidrita) o de las piritas. La disolución congruente de los minerales yeso y anhidrita generan sulfatos según las siguientes reacciones:

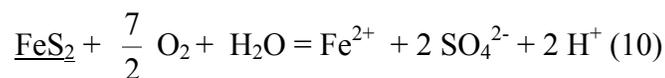
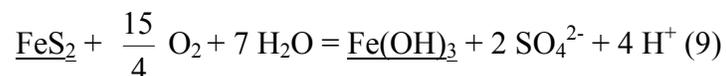


Yeso



Anhidrita

Las piritas, por el contrario, requieren ser oxidadas previamente a sulfato antes de ser utilizadas por las bacterias anaeróbicas generadoras de sulfuros. El proceso de oxidación de las piritas también es catalizado por las bacterias, en este caso de los géneros *Beggiotoa*, *Thiothin*, *Thioplaca*, *Thioradaceas* y otras (Bitton, 1994). Este proceso puede ser completo (ecuación 9) o incompleto (ecuación 10), en dependencia del oxígeno libre o combinado disponible en el medio.



Cuando se produce la oxidación completa (9) se oxidan tanto el sulfuro como el hierro, mientras que cuando esta reacción es incompleta (10) sólo se oxidan los sulfuros, originándose ion ferroso en el medio acuático.

En la Sierra del Rosario, donde no existen yacimientos de yeso cercanos a la superficie, las aguas minerales sulfuradas se originan por oxidación de piritas y reducción parcial de sulfatos. Otras posibles fuentes de sulfuros pudieran atribuirse a la materia orgánica presente en los asfaltos que acompañan los sedimentos carbonatados (Cofiño y Cáceres, 2002) o al propio H_2S ocluido en las calizas fétidas de la región (Embil, 1947).

RELACIONES ENTRE EL POTENCIAL DE OXIDACIÓN REDUCCIÓN, EL PH Y EL CONTENIDO DE H_2S

Diagramas de estabilidad Eh vs pH

El contenido relativo de los compuestos que contienen azufre en forma oxidada o reducida (SO_4^{2-} , H_2S , HS^- , S^{2-}) en las aguas subterráneas depende de las condiciones oxido-reductoras y del pH del medio. En un medio oxidante donde el potencial redox es elevado (Eh positivo o mayor de -100 mv), el azufre se encuentra presente en forma de sulfato, mientras que en un medio reductor (por debajo de -100 mv), los sulfatos se reducen a sulfuro, sulfhídrico o sulfhidrilo. A valores de pH inferiores a 7 predomina el H_2S , mientras que a pH mayores de 7 es más relevante el HS^- .

El nivel del potencial redox de las aguas subterráneas depende de varios factores: contenido de oxígeno de las aguas de recarga, distribución y reactividad de la materia orgánica y otros reductores presentes, distribución de los compuestos que poseen acción buffer oxido-reductora (Mn^{2+} - MnO_2 , Fe^{2+} - Fe_2O_3 , H_2S - FeS_2 , H_2S - SO_4^{2-} , etc.) y de la velocidad de circulación de las aguas (Drever, 1982).

Los diagramas de Eh en función del pH constituyen una valiosa herramienta para estimar las zonas definidas por la relación de estas magnitudes, donde son más estables los diferentes compuestos de azufre en sus estados sólido, acuoso o gaseoso). Dichas zonas se definen mediante las ecuaciones termodinámicas deducidas a partir de los equilibrios químicos.

En la figura 3 se muestra la ubicación en el diagrama de Eh vs pH de los pares de datos correspondientes. A partir de la información que brinda en el diagrama, se puede inferir las siguientes consideraciones:

1. Las aguas superficiales y subterráneas someras (arroyos y manantiales no sulfurados de Las Terrazas, Mil Cumbres, Rancho Lucas, Cayajabos y Cajalbana aparecen en la zona de estabilidad de los compuestos más oxidados (SO_4^{2-}) no poseen H_2S .
2. En la zona de estabilidad del HS^- ($\text{pH} > 7$), se distribuyen las aguas minerales de Las Terrazas (algunas en el límite con la zona de estabilidad del FeS_2 o dentro de la misma), Soroa, Mil Cumbres sulfurado y El Sitio.
3. En la zona de estabilidad del H_2S ($\text{pH} < 7$), se localizan las aguas minerales de San Diego de los Baños y Los Bermejales.

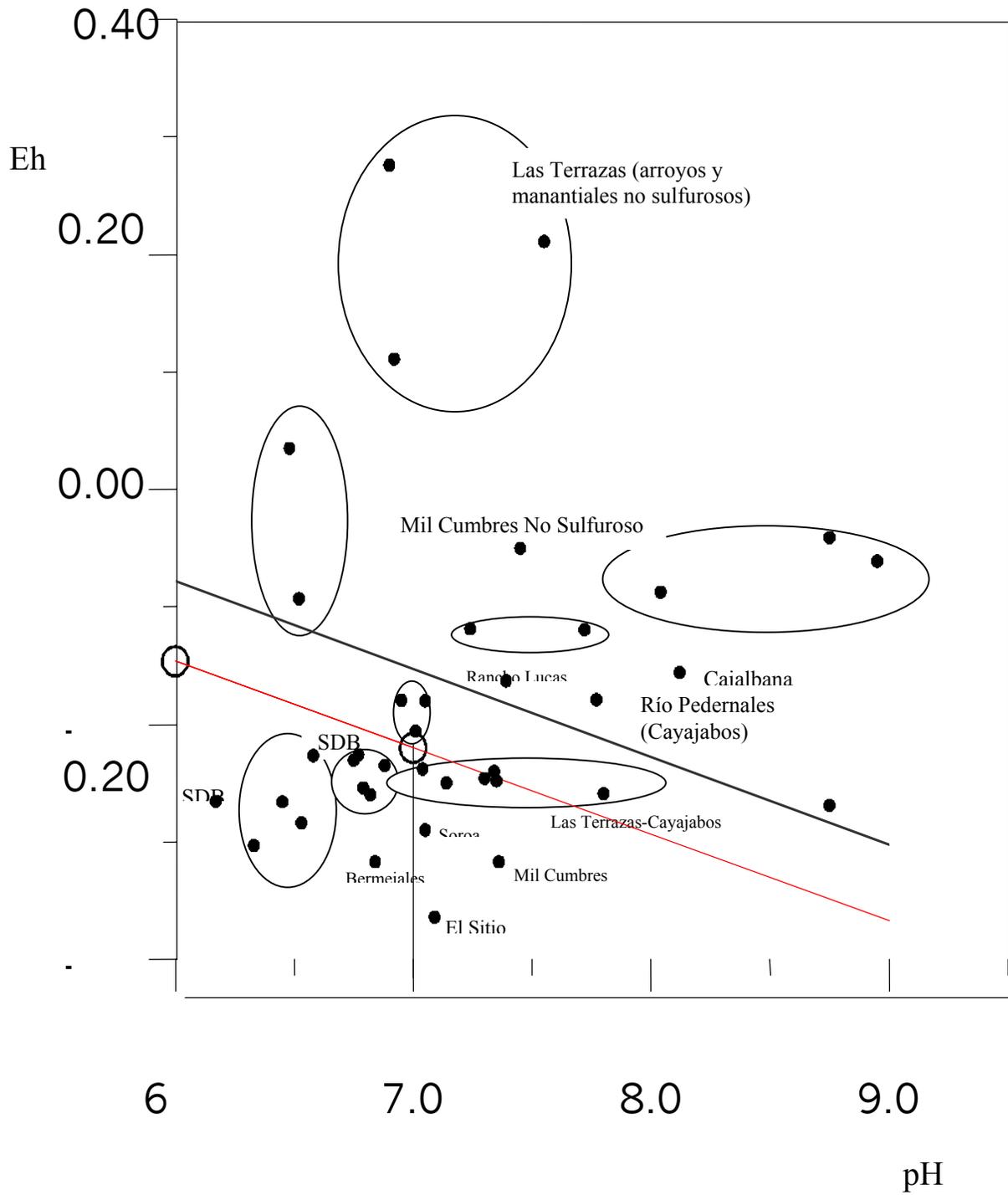


Figura 3. Relación entre el potencial redox y el pH

VARIACIÓN DEL CONTENIDO DE H₂S DE LAS AGUAS MINERALES

Teniendo en cuenta que la producción de los compuestos sulfurados constituye un proceso de tipo biogeoquímico, donde las reacciones químicas de oxidación – reducción son catalizadas por microorganismos que requieren de la presencia de nutrientes, es interesante conocer cómo varía el contenido de los componentes bioactivos beneficiosos para los tratamientos crenoterápico (H₂S, HS⁻, S²⁻), tanto en profundidad como a través del tiempo y por acción de la explotación del yacimiento. Con estos objetivos se utilizarán como ejemplos ilustrativos, algunas fuentes en las cuales se disponen de la información requerida.

Variación del contenido de H₂S con la profundidad

La variación del H₂S con la profundidad puede ser analizada mediante los datos correspondientes a los pozos P 1 (San Diego de los Baños) y P 4 (Los Bermejales), a partir de los datos que aparecen en los informes de los trabajos de prospección correspondientes (Peláez et al, 1990). En la tabla 6 se muestran estos resultados.

Tabla 6. Variación del contenido de H₂S de las aguas minerales con la profundidad

Pozo No.	Yacimiento	Intervalo de profundidad (m)	Profundidad media del intervalo (m)	Contenido de H ₂ S (mg/l)
P 1	San Diego de los Baños	0-122	61	9.0
		240-181	260	18.5
		237-320	278	40.0
P 4	Los Bermejales	103-206	155	23.9
		145-195	165	23.9
		206-300	253	61.5

Debe esperarse que en dependencia de las conducciones óxido-reductoras, el tipo de mineral formador de sulfatos, el pH y la temperatura del medio, existirá una profundidad óptima para la generación del H₂S. En la parte más superficial del yacimiento, la influencia del oxígeno disuelto puede limitar la acción de las bacterias anaeróbicas, mientras que a grandes profundidades las elevadas temperaturas pueden inhibir su viabilidad. El gradiente geotérmico local tampoco es el mismo en todos los sitios, lo cual pudiera conllevar a diferencias en la profundidad óptima de generación de H₂S entre los distintos yacimientos.

A partir de los resultados que aparecen en la tabla 6 se aprecia como tendencia, un aumento del contenido de H₂S con la profundidad de los pozos.

Variación diaria del contenido de H₂S

La variación en el tiempo de contenido de H₂S es otro aspecto que tiene interés para los tratamientos balneológicos. Con respecto al tiempo pueden distinguirse aquellas variaciones de tipo diurno y diaria donde pudiera influir el ciclo diario de los microorganismos; de las de tipo estacional, donde los cambios pueden estar determinados por el ciclo hidrológico. En ambos casos, la variabilidad de la concentración de sulfuros debe ser mayor en las aguas subterráneas someras que en las aguas minerales.

Tal como se aprecia en la tabla 7, la concentración de H₂S durante 768 días (23/09/88 – 25/09/89) en el pozo P1 (San Diego de los Baños) varía muy poco, lo cual se refleja en el bajo valor del coeficiente de variación (4.615 %).

Tabla 7. Variación diaria del contenido de H₂S del pozo P 1 (San Diego de los Baños) durante 768 días

Intervalo de medición	N	X ± S	C.V. (%)
23/09/88 – 25/09/89	28	26.91 ± 1.24	4.61

Variación estacional del contenido de H₂S

El efecto del ciclo hidrológico sobre el contenido de H₂S de las aguas minerales puede ilustrarse a partir de series cronológicas obtenidas mediante mediciones mensuales a lo largo de un año de observación, con frecuencia de muestreo mensual o mediante mediciones sistemáticas en períodos secos y húmedos respectivamente. Debido a la ausencia de mediciones sistemáticas mensuales de las aguas estudiadas, se utilizaron mediciones hechas durante varios años en periodos secos y húmedos. En la tabla 3 se muestra el comportamiento estacional de las aguas de los manantiales El Templado y La Gallina del yacimiento San Diego de los Baños y la del manantial M 1. del yacimiento Los Bermejales. La concentración de H₂S de esos sitios en el intervalo 1987-1990 fue de: 10.13 ± 2.13; 15.42 ± 2.96 y 39.67 ± 2.25 y sus coeficientes de variación de 20.99 %, 19.22 % y 5.66 % respectivamente.

Estos resultados indican que se manifiesta un efecto apreciable del régimen de lluvia sobre la concentración de H₂S de dichas aguas, posiblemente debido a procesos de mezcla con otras aguas más someras. Estos resultados, junto a otros menos representativos debido a la naturaleza del muestreo se presentan en la tabla 8.

Tabla 8. Variación del contenido de H₂S (mg/l) de algunas fuentes de aguas minerales sulfuradas de la Sierra del Rosario.

Yacimiento	Fuente	Intervalo de medición	N	X ± S	C.V. (%)
San Diego de los Baños	M. El Templado	15/09/87 – 28/04/90	11	10.13 ± 2.13	20.99
	M. La Gallina	15/10/87 – 25/04/90	9	15.42 ± 2.96	19.22
	P 19	11/09/89 – 21/10/89	5	8.77 ± 2.37	27.03

Variación del contenido de H₂S por efecto de la explotación continua

El conocimiento de la variación de la concentración de H₂S por efecto de la explotación ha que es sometida la fuente es de interés por el hecho de que, en los balnearios, es necesario establecer el límite en el cual la explotación no cambia las propiedades terapéuticas y sanitarias de las aguas.

En la tabla 4 se muestra la variación del contenido de H₂S del pozo P1 (San Diego de los Baños) durante los trabajos de explotación detallada llevados a cabo por Peláez et al (1990). Dicho pozo fue sometido en esa ocasión a un bombeo experimental continuo durante 405 horas, y como se aprecia en la figura de referencia, el mismo no causó ningún cambio apreciable en la concentración de H₂S. Nótese que la variación del contenido de H₂S fue relativamente pequeña en este pozo (coeficientes de variación de 1.83 y 5.65 % correspondientes a dos experimentos), la cual no fue muy diferente en condiciones estáticas (coeficiente de variación; 4.61 %), tal como se aprecia en la tabla 8. Estos resultados indican que no se produce un cambio significativo como resultado de la explotación continua.

Tabla 9. Variación del contenido de H₂S (mg/l) en el pozo P 1 (San Diego de los Baños) como resultado de la explotación continua.

No	Horas	H ₂ S (mg/l)	
		Experimento 1	Experimento 2
1	24	27.80	27.70
2	48	28.11	27.11
3	72	27.48	25.63
4	96	27.02	26.62
5	120	27.54	25.97
6	144	27.07	29.96
7	168	27.36	26.58
8	192		26.82
9	216	26.88	28.69
10	264	26.47	26.32
11	336		28.78
12	360		29.24
13	384		27.93
14	405		24.40
N		9	14
X		27.30	27.26
S		0.50	1.54
C.V. (%)		1.83	5.64

CONCLUSIONES

- Los 11 yacimientos de aguas minerales sulfuradas estudiados se encuentran distribuidos en 1 región natural, correspondientes a 1 región hidrogeológica.
- Los yacimientos de aguas minerales sulfuradas estudiados en la Sierra del Rosario, están constituidos por una variada litología: calizas, areniscas, rocas tobáceas y serpentinita, entre otras. Los macizos presentan numerosas grietas y fisuras asociadas al desarrollo del carso, la presencia de fallas y de escamas tectónicas, las cuales facilitan el descenso de las aguas hacia la profundidad, su calentamiento en virtud del gradiente geotérmico y su ascenso a la superficie.
- De las 49 fuentes representativas tomadas para este estudio, la mayor parte está constituida por aguas bicarbonatadas cálcicas (4), y sulfatadas cálcicas (9), existiendo además otros tipos hidroquímicos en menor proporción: bicarbonatadas sódicas (4), y sulfatadas mixtas (2)
- Se aprecian 20 patrones hidrogeoquímicos, lo cual apunta aproximadamente a una identidad hidrogeoquímica propia que distingue a cada yacimiento. Esta especificidad se hace más evidente si se consideran además las propiedades físicas (temperatura, pH, etc.), la mineralización y los microconstituyentes de las aguas.
- Desde el punto de vista balneológico, clasifican 15 grupos. Esta clasificación toma en cuenta tanto los componentes principales de las aguas, como la presencia de otros elementos de reconocida acción farmacológica y terapéutica (CO₂, Rn, SiO₂, Fe, F, Br, I, Sr, Ba, B, etc.).
- Las aguas minerales sulfuradas de la Sierra del Rosario se originan por reducción de sulfatos procedentes de piritas, de la materia orgánica presente en las calizas o del H₂S ocluido en las mismas. El contenido de relativo de sulfuros en forma de sulfuro o polisulfuro (S²⁻), sulfhídrico (H₂S) o sulfhidrilo (HS⁻) depende de los valores del potencial de oxidación reducción (Eh) y del pH del medio.

- Otros procesos geoquímicos que acompañan por lo general a la formación de sulfuros son: disolución congruente de calcita, dolomita, halita y serpentina; disolución incongruente de plagioclasas (albita, anorthita y microclino); generación de CO₂, así como precipitación de cuarzo.
- Se demuestra que la magnitud ΔEh (que expresa la diferencia entre el valor del potencial redox medido en las aguas y el potencial redox correspondiente al estado de equilibrio de las fases (diagrama de Eh en función del pH) es proporcional al logaritmo del contenido de H₂S. Existe buena correlación entre los datos de Eh y log (H₂S) reales y los estimados mediante las ecuaciones termodinámicas deducidas a partir de los equilibrios químicos.
- Mientras en unos casos no se encuentran, variaciones temporales diarias o estacionales del contenido de H₂S apreciables, ni tampoco variaciones significativas debidas a la explotación continua de los yacimientos, en otros casos, esas variaciones son considerables, debido posiblemente a procesos de mezcla de aguas.

RECOMENDACIONES

- Es conveniente emplear técnicas isotópicas para esclarecer el origen de los sulfuros de las aguas mineromedicinales de la Sierra del Rosario.

BIBLIOGRAFIA

APHA – AWWA – WPCF (1992). “Métodos Normalizados para el análisis de Aguas Potables y Aguas Residuales, Am. Public Assoc., Edición 17th. Editorial Grijalbo (Madrid), 4-1 – 4-235.

Academia de Ciencias de Cuba (Instituto de Geología y Paleontología). Mapa Geológico de Cuba. Escala 1: 250 000, 1989.

Alvarez-Nodarse, A. y A. M. Moreno, Las aguas minerales y mineromedicinales de Cuba. En Contribución a la Hidrogeología y Medio Ambiente en Cuba, 301-306. Eds.: J. R. Fagundo, D. Pérez, J.M. García, A. Alvarez – Nodarse, 1996.

Appelo C. A. J. and D. Postma. Geochemistry, Groundwater and Pollution. Ed. Balkema, Rotterdam, Netherlands, 536 Págs., 1993.

Armijo-Valenzuela, M. y J. San Martín Clasificación de las aguas mineromedicinales. En: Curas Balnearias y Climáticas. Talasoterapia y Helioterapia, Ed. Computense, Madrid, 219-223, 1994.

Bitton, G. (1994). Role of Microorganisms in Biogeochemical Cycles. In: Wasterwater Microbiology. Ed. Wiley-Liss, 51-73.

Cofiño A. y C.E. Cáceres, D., (). Efectividad de la utilización de los métodos microtectónicos en el desciframiento de la evolución de estructuras tectónicas (Falla Pinar). Minería y Geología N 2 del Vol. XIX, 2002.

Drever, J. I. (1982). “The Geochemistry of Natural Waters”. Ed. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 430 Págs.

Dirección Provincial de Planificación y Empresa Geólogo Minera del MINBAS, Pinar del Río. Marzo 1998.

Embil, J y F. Trelles. Estudio de los Baños de Sal y Cruz (Baños de Azufre) en San Cristóbal, Pinara del Río, Archivos del Instituto de Hidrología, Climatología Médicas, Año 1, No 2: 16-19, 1947.

Embil, J. “El ácido sulfhídrico de las aguas medicinales de San Diego de los Baños y su posible relación con las calizas fétidas de donde brotan”. Archivos del Instituto Nacional de Hidrología y Climatología Médicas, Año I, No 4, 17-20, 1947.

Ergorov, S.V. y J.R. Luge. Hidrogeología de Cuba. INRH, ICRM, La Habana, 84 Págs, 1967.

Fagundo, J.R Química del Agua Kárstica. En: Hidroquímica del Karst. Editores: J.R. Fagundo, J.J. Valdés y J.E. Rodríguez. Ediciones Osuna, Universidad de Granada (España), 14-119, 1996.

Fagundo, J.R., P. González, M. Suárez, J. Fagundo-Sierra, C. Melián, M. Llerena y L. Sánchez. Origen de la composición química de las aguas naturales y minerales procedentes de acuíferos no carbonatados de la Sierra del Rosario. En: “Contribución a la Educación y la Protección Ambiental”. Editorial Academia, ISCTN 959-02-02535. Vol. 1, 204-210, 2000a.

Fagundo, J.R., P. González, M. Suárez, J. Fagundo-Sierra, C. Melián y M. Llerena. Origen de la composición química de las aguas naturales y minerales procedentes de acuíferos carbonatados de la Sierra del Rosario. En: “Contribución a la Educación y la Protección Ambiental”. Editorial Academia, ISCTN 959-02-02535. Vol. 1, 198-203, 2000b.

Fagundo, J.R., P. González, M. Suárez, J. Fagundo-Sierra, L. Sánchez, B. Peña y C. Melián. Origen de la composición química de las aguas del sistema hidrotermal San Diego de los Baños-Los Bermejales, Pinar del Río. En: Memorias del VII. Taller de la Cátedra de Medio Ambiente, ISCTN, La Habana. Soporte electrónico, 2001.

Fagundo, J.R., P. González, M. Suárez, J. Fagundo-Sierra, C. Melián. Origen y composición química de las aguas minerales sulfuradas de Cuba. Su relación con el medio ambiente geológico. En: Contribución a la Educación y la Protección Ambiental, 2002. ISBN 959-7136-13-9 (en soporte electrónico), 2002.

Fagundo-Sierra, J. Modelo para la determinación del origen de la composición química de aguas naturales”. Tesis de Diploma Universitario. Facultad de Química (U.H.), 2000.

Fagundo-Sierra, J., J.R. Fagundo, P. González y M. Suárez. “Modelación de las aguas naturales. En: Memorias del VII. Taller de la Cátedra de Medio Ambiente, ISCTN, La Habana. Soporte electrónico, 2001.

González, P., M. Suárez, G. Benítez, J. Ramírez y J.R. Fagundo. Caracterización de aguas minerales de algunos yacimientos del país. Le Monde du Thermalisme. Ed. L' Organisation Mondiale du Thermalisme (O.M.Th). París (Francia), 14-15, 2000.

González P., M Llerena, M. Suárez, J.R. Fagundo, C. Melián, B. Luna, e I. Herrera. Sectorización de las aguas naturales y mineromedicinales de las montañas de la Sierra del Rosario y las Alturas del Mariel. En: Memorias del VII. Taller de la Cátedra de Medio Ambiente, ISCTN. La Habana. Soporte electrónico, 2001.

Gutiérrez, R. y M. R. Glean. Regiones Naturales de la Isla de Cuba. Ed. Científico Técnica. Ciudad de la Habana, 145 Págs., 1999.

Karakolez, D. Fundamentos de la Balneoterapia. Ed. Medicina y Cultura Física. Sofía, 298 Págs., 1984.

Llerena, M E. Caracterización hidrogeoquímica de las aguas de la Sierra del Rosario y las Alturas del Mariel". Tesis de Maestría en Ciencias en Protección y Evaluación de Impacto Ambiental. ISCTN. 2001.

Llerena, M., P. González, J. R. Fagundo, M. Suárez y C. Melián. Aguas naturales, minerales y mineromedicinales de la Sierra del Rosario y las Alturas del Mariel. Regionalización de acuerdo a su tipo hidroquímico, mineralización, temperatura y uso terapéutico. En: Memorias del VII. Taller de la Cátedra de Medio Ambiente, ISCTN. La Habana. Soporte electrónico, 2001, 1991.

N.C. 93-01-218: 1995. Norma Cubana de Agua Mineral. Oficina Nacional de Normalización (La Habana, Cuba), 8 Págs., 1995, 1995.

Nuevo Atlas Nacional de Cuba, Instituto de Geografía, 1988.

Peláez, R., Ma. C. Alvares, R. Nuñez y M. Valdivia. Informe para la búsqueda detallada. Exploración orientativa de las aguas minero-medicinales de San Diego de los Baños. . Empresa Pinar del Río, 1990

Peña, B. Caracterización de Sistemas Hidrominerales en el Distrito Físico Geográfico Pinar del Río. Tesis de Maestría en Geografía, Medio Ambiente y Ordenamiento Territorial. Facultad de Geografía (U.H.), 2000.

Pszczolkowski, A. Geosynclinal sequences of the Cordillera de Guaniguanico in western Cuba, their lithostratigraphy, facies development and paleogeography. Acta Geológica Polónica, 28 (1) 1-96, 1978.

Romero, J. Aguas minerales, mineromedicinales y peloides. Uso con fines turísticos. Memorias del I Congreso Latinoamericano de Turismo y Salud, México. Edición en soporte electrónico, 2000.

San Martín J. y M. Armijo-Castro. El azufre en las aguas mineromedicinales: aguas sulfatadas y aguas sulfuradas. En: Curas Balnearias y Climáticas. Talasoterapia y Helioterapia, Ed. Competense, Madrid, 243-256, 1994.