

J.R. Fagundo, 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.

COMPOSICION QUIMICA DE LAS AGUAS MINERALES SULFURADAS DE CUBA

J. R. Fagundo¹, B. Peña¹, P. González¹, J. Fagundo-Sierra¹, M. Suárez¹, C. Melián¹, M. Llerena².

¹. Centro Nacional de Termalismo "Víctor Santamarina" (CENTERVISA), ². Instituto de Geografía, Tropical, Ciudad Habana, Cuba.

RESUMEN

Se estudian las características químico - físicas y el origen de la composición química de las aguas minerales sulfuradas, correspondientes a 24 yacimientos distribuidos en 8 regiones naturales (9 regiones hidrogeológicas) de Cuba, mediante modelos de reconocimiento de patrones, balance de masas y mezcla de aguas. Las facies hidroquímicas presentes son numerosas: bicarbonatadas, cloruradas, sulfatadas, cálcicas, sódicas, magnésicas 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, representadas estas últimas por depósitos carbonatados, carbonatados terrígenos, esquistos, areniscas y rocas efusivas e intrusivas metamorizadas de edades comprendidas entre el Jurásico Inferior y el Paleógeno. En menor medida, también influye en el modo en que algunas aguas minerales adquieren su composición, el desarrollo de la carsificación en los macizos carbonatados. 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. También se calcula la magnitud $\Delta Eh = - (Eh_{real} - Eh_{teorico})$, la cual corelaciona significativamente con el logaritmo de la concentración de H₂S.

Las variaciones diurna, diaria y estacional del contenido de H₂S de las aguas minerales sulfuradas, así como las variaciones debida a la explotación continua de las mismas a un determinado caudal, fue estudiada en aquellas fuentes que poseían información disponible, poniéndose de manifiesto diferencias en el comportamiento: mientras en unas fuentes fueron poco apreciables las variaciones, en otras estos fueron significativos.

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). El contenido relativo de sulfuro de hidrógeno (H₂S) o ion sulfhídrico (HS⁻) depende del pH, predominando la primera especie a valores inferiores a 7 y la segunda a valores superiores. Por encima de pH 11 predomina el sulfuro (S²⁻).

Además de las acciones terapéuticas y farmacológicas relacionadas con los compuestos sulfurados, las aguas minero-medicinales sulfuradas suelen estar acompañadas de otros iones, tales como SO_4^{2-} , Cl^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , así como componentes minoritarios: Rn, As, Fe, Cu, Co, Si, F, etc., los cuales le confieren otras propiedades beneficiosas en las curas balnearias.

Entre las principales indicaciones terapéuticas de las aguas minerales se pueden citar: afecciones reumatológicas y del aparato locomotor, enfermedades ginecológicas, afecciones de las vías respiratorias, afecciones de la piel, afecciones odonto-estomatológicas, enfermedades neurológicas, enfermedades cardiovasculares e intoxicaciones con metales pesados (San Martín y Armijo-Castro, 1994).

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 nuestro país, 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. Además, se determinan relaciones matemáticas entre el potencial de oxidación – reducción y el contenido de H_2S , así como la variación diurna, diaria, estacional y debido a la explotación del yacimiento de la concentración de H_2S .

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.

Los datos fueron tomados a partir de la información de archivo (informes de exploraciones orientativas y detalladas efectuadas por las Empresas de Geología del MINBAS y otras instituciones), 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 y los procesos geoquímicos que explican el origen de la composición química de las aguas fueron determinados mediante modelos de reconocimiento de patrones (Fagundo, 1996), balance de masas y de mezcla de aguas (Fagundo-Sierra, 2000; Fagundo-Sierra et al, 2001).

Tabla 1. Principales propiedades físicas y químicas de las aguas minerales sulfuradas de Cuba

No	Yacimiento	T (°C)	PH	TSS (mg/l)	H ₂ S (mg/l)	HCO ₃ (mg/l)	Cl (mg/l)	SO ₄ (mg/l)	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	Na+K(mg /l)
1	Zequeira	24.0		623	17.0	212.0	45.0	295.0	127.0	34.0	37.0
2	San Vicente	28.6	6.88	1789	1.0	214.0	13.0	1059.0	445.0	42.4	15.9
3		28.6	6.90	1798	0.8	460.0	13.0	1053.0	460.0	36.1	15.9
4		31.0	7.40	1193	7.5	229.0	18.0	900.0	410.0	9.0	37.0
5		29.0	7.30	1255	8.1	229.0	23.0	970.0	410.0	38.0	22.0
6	Cueva Portales	27.0	7.02	1232	10.0	268.4	56.1	556.8	192.0	26.4	132.0
7	El Sitio	22.7	7.09	1107	198.9	738.1	8.0	158.4	100.0	45.6	157.1
8	Mil Cumbres	23.7	7.36	1142	21.6	597.8	57.2	170.4	46.0	22.2	248.6
9	Cacarajícara	26.1	7.04	760	8.1	359.9	27.9	165.6	98.0	13.2	95.2
10	San Diego Baños	36.0	7.15	1055	4.0	304.6	31.8	709.0	326.7	36.0	32.6
11		36.0	7.40	1407	6.0	283.2	17.6	1026.6	425.8	49.2	30.8
12		31.0	6.50	2662	27.5	213.0	43.0	1650.0	570.0	61.0	125.1
13	Bermejales	31.0	7.60	1531	38.5	319.0	61.0	1220.0	504.0	57.0	76.0
14		30.0	8.90	1189	23.9	592.8	97.3	120.5	2.4	13.4	362.5
15	Sal y Cruz	25.0	7.65	1128	1.0	174.0	73.1	558.0	250.0	32.0	41.1
16	Rancho Mar	25.0	7.50	1882	87.0	1052.0	250.0	54.0	81.0	27.0	499.0
17	Pozo Azul	30.0	7.50	446	1.5	370.0	9.0	22.0	84.0	20.0	25.0
18	Soroa	27.0	7.00	520	15.00	384.0	69.0	23.0	97.9	31.0	23.0
19	Las Terrazas	27.1	7.23	470	7.8	311.2	22.7	19.2	76.1	14.6	26.2
20		27.0	6.88	573	8.6	390.4	24.9	19.2	96.0	21.6	20.7
21	Cayajabos	24.8	7.30	686	10.0	457.6	43.3	9.6	123.3	12.6	39.5
22		25.0	6.85	759	10.0	439.3	52.5	71.1	147.0	17.1	32.7
23	Martín Mesa	28.0	7.30	766	5.9	500.0	54.0	17.8	100.0	24.5	69.8
24	Sata María	26.0	8.04	1451	2.2	414.7	513.3	60.6	47.1	7.9	454.9
25	Rosario	25.5	7.89	1234	1.3	527.1	281.1	89.7	40.4	20.9	315.4
26		26.0	8.32	1426	2.7	482.1	401.9	79.4	12.0	4.9	458.1
27	Cantel	24.7		4500	15.0	1200.0	1200.0	950.0	350.0	150.0	1000.0
28	Madruga	25.0	7.95	653	5.5	504.0	106.5	42.0	68.1	106.1	57.7
29		26.0	7.50	604	2.5	456.0	98.6	50.0	30.0	74.4	83.3
30		26.0	7.55	472	3.7	280.1	18.1	68.2	38.0	54.7	2.8
31	San Miguel Baños	26.0	7.0	740.0	6.0	538.0	47.0	190.0	76.0	96.0	58.0
32		25.0	7.38	869	6.0	534.0	20.7	166.0	56.1	102.0	44.8
33		25.0	8.32	769	14.0	462.0	112.0	44.0	35.0	69.0	82.0
34		25.0	7.57	593	1.5	478.0	29.0	14.0	30.0	64.0	15.0
35	Menéndez	40.0	6.60	64200	39.7	400.0	35000.0	4000.0	1800.0	2000.0	20000.0
36	Elguea	51.0	6.80	47074	11.2	202.0	27799.0	3999.0	1679.0	1389.0	15902.0
37		40.0	6.50	47404	10.8	226.0	27522.0	3941.0	1693.0	1296.0	16885.0
38		41.2	6.29	52801	8.3	213.5	26304.1	7195.7	1596.8	1303.2	16187.6
39		35.9	6.45	51500	7.0	210.5	25948.4	6716.2	1596.0	1303.2	15726.3
40		40.1	6.53	51500	6.0	210.5	25949.4	6716.2	1596.8	1303.2	15726.3
41		35.5	6.51	47645	6.0	243.0	27735.0	3924.0	1702.0	1292.0	15720.0
42		Ciego Montero	36.0	9.25	2005	0.9	48.5	1035.0	182.0	63.0	1.2
43	36.8		8.75	1007	1.0	9.2	1066.4	201.6	63.8	0.0	735.1
44	36.0		7.90	1007	1.0	549.0	69.0	68.0	67.0	32.0	155.0
45	36.0		8.30	1995	1.0	36.0	1095.0	86.0	76.0	0.0	702.0
46	San José Lagos	30.8	7.01	585	1.0	339.2	40.1	43.2	69.8	24.1	68.5
47		30.9	7.72	590	0.9	341.6	40.5	40.3	69.8	23.6	74.5
48		30.0	7.50	480	1.2	329.0	38.0	0.3	70.0	22.7	20.0
49	La Cuquita	35.5	7.40	5606	2.6	64.1	5127.2	439.8	1638.3	3.0	1881.7

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 el colectivo de trabajo.

Las ecuaciones termodinámicas correspondientes a los diagramas de estabilidad Eh – pH, así como las utilizadas para calcular los potenciales redox teóricos, fueron deducidas a partir de 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).

REGIONALIZACION DE LAS AGUAS MINERALES SULFURADAS DE CUBA

Teniendo en cuenta que en nuestro país están ampliamente representadas las aguas minerales sulfuradas, es necesario hacer una distribución de sus yacimientos atendiendo tanto al criterio basado en las Regiones Naturales (Unidades de paisajes) como a las Regiones Hidrogeológicas donde se encuentran emplazados los yacimientos. En el primer caso, la distribución es útil con fines de planificación y de explotación del recurso, mientras que en el segundo caso, la utilidad radica en poder relacionar las características del recurso con las propiedades geológicas e hidrogeológicas del territorio.

Las Regiones Naturales del territorio de Cuba se subdividen en Provincias, Subprovincias (Cuba Occidental-Central y Cuba Oriental), Distritos, Subdistritos y Regiones, mientras que las Regiones Hidrogeológicas se subdividen en ocasiones en subregiones. En este trabajo se hace referencia solamente a aquellas unidades tanto naturales como hidrogeológicas donde se encuentren ubicados los yacimientos de aguas sulfuradas objeto de estudio.

En la tabla 2 se presentan ambos tipos de regionalización y los yacimientos ubicados en dichas regiones. Como puede apreciarse en la misma, las muestras seleccionadas corresponden a 49 fuentes representativas, las cuales se encuentran ubicadas en 24 yacimientos, distribuidos en 8 regiones naturales y 9 regiones hidrogeológicas.

1. Región Llanura Norte de Pinar del Río

Constituye una estrecha franja litoral al norte del Distrito Pinar del Río, cuyo ancho promedio es de 5 km. La misma ocupa un área aproximada de 1 683 km². Se extiende al norte de la Cordillera de Guaniguanico hasta el mar y comprende la parte septentrional de los municipios de Mantua, Minas de Matahambre y La Palma. Limita al norte y noreste con las regiones naturales Llanuras Sumergidas del Golfo de Guanahacabibes e Islas del Archipiélago de los Colorados; mientras que al sur y el sureste lo hace con las Montañas de la Sierra de los Órganos y de la Sierra del Rosario, al este limita con las Llanuras y Alturas del Norte de La Habana-Matanzas. Esta unidad paisajística se corresponde, en el área del yacimiento estudiado, con la región hidrogeológica Mantua – Consolación del Norte (La Palma). En esta región se encuentra ubicado el yacimiento de aguas mineromedicinales sulfuradas conocido por Zequeira.

Tabla 2. Regiones Naturales y Regiones Hidrogeológicas de Cuba donde se encuentran los yacimientos de aguas minerales

División	Región natural	Región Hidrogeológica	Yacimiento
Subprovincia: Cuba Occidental Distrito: Pinar del Río Subdistrito: Llanuras de Pinar del Río	1. Llanura Norte de Pinar del Río	1. Mantua-Consolación del Norte (La Palma)	1. Zequeira
Subprovincia: Cuba Occidental Distrito: Pinar del Río Subdistrito: Montañas de la Cordillera de Guaniguanico	2. Montañas de la Sierra de los Organos	2. Pinar del Río- Viñales – San Cristobal – Soroa- Artemisa Subregión: Guane–San Diego	3. San Vicente 1. Cueva de los Portales
	3. Montaña de la Sierra del Rosario	2b) Subregión: San Diego - Artemisa	4. El Sitio 5. Mil Cumbres 6. Cacarájicara 7. S. Diego de los Baños 8. Bermejales 9. Sal y Cruz 10. Rancho Mar 11. Pozo Azul 12. Soroa 13. Las Terraza 14. Cayajabos
Subprovincia: Cuba Occidental Distrito: Habana-Matanzas Subdistrito: Llanuras del Norte de La Habana-Matanzas	4. Llanuras y Alturas del Norte de La Habana - Matanzas	3. Habana - Matanzas	15. Martín Mesa 16. Sta. María del Rosario
		4. Bolondrón-Aguada de Pasjeros	17. Madruga 18. S. Miguel de los Baños
		5. Cárdenas-San José	19. Cantel
Distrito Centro Subdistrito: Llanura del Norte	5. Llanura Corralillo - Yagüajay	6. Parte Norte de las Provincias Villa Clara y Sancti Spíritus	20. Menéndez 21. Elguea
Subdistrito: Llanuras y Alturas de Cubanacán	6. Llanura de Manacas - Cienfuegos	7. Cienfuegos Sancti Spíritus	22. Ciego Montero
	7. Alturas de la Cordillera Septentrional	8. Pare Norte de las Villas	23. San José de los Lagos
Subprovincia: Cuba Oriental Distrito: Sierra Maestra Subdistrito: Montañas de la Sierra Maestra Oriental	8. Montañas de la Sierra del Turquino	9. Sierra Maestra	24. La Cuquita

Yacimiento Zequeira

Este yacimiento se encuentra al noroeste de la Región, a 3 Km al este del poblado Arroyos de Mantua, municipio del mismo nombre. Las coordenadas de su centro son: X: 155 200, Y: 284 600.

La estructura geológica del área es muy compleja. Está representada por depósitos terrígeno - carbonatado y carbonatado – terrígenos de la Fm. Esperanza de edad Jurásico superior Cretácico inferior (Tab. 3a), constituidos por areniscas, calizas silicíticas, brechas, conglomerados, tufitas, tobas, lavas andesitas y basaltos (Gutiérrez y Glean, 1999).

Tabla 3a. Formaciones geológicas y litología de las regiones relacionadas con los yacimientos de aguas minerales sulfuradas. Llanura Norte de Pinar del Río y Montañas de la Sierra de los Organos

No	Edad (Símbolo)	Formación	Composición	Yacimiento
1	Paleógeno - Eoceno (P ₁₋₂)	Pica Pica (Manacas)	Areniscas, esquistos, calizas, pedernales y olistostromas	
2	Cretácico 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		Fm. Martín Mesa	Calizas masivas y estratificadas (biomicritas), calcarenitas,	Martín Mesa.
5	Cretácico inferior Aptiano-Albiano (K _{1a-al})	Encrucijada (Sábalo)	Lavas basálticas, andesíticas, silicitas, argilitas, aleurolitas	
6	Cretácico inferior Valanginiano-Albiano (K _{1 v-al})	Polier	Calizas bituminosas, areniscas cuarzosas, argilitas	
7	Cretácico inferior erriasio-Barremiano (K _{1b-bm})	Lucas	Calizas (biomicritas) estratificadas, argilitas calcáreas.	
8	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
9		Esperanza	Calizas organógenas, pelitomórficas, bituminosas, areniscas cuarzosas, argilitas	Zequeira
10	Jurásico superior Oxfordiano – Tithoniano (J _{3 ox-t})	Guasasa (m San Vicente)	Calizas masivas, calcarenitas, calciruditas calcareas fosilíferas	San Vicente Cueva Portales
11	Jurásico superior Oxfordiano (J _{3 ox-j})	Jagua	Clizas, lutitas y argilitas, concreciones calcáreas	San Vicente
12	Jurásico Inferior- superior Oxfordiano (J _{1-J₃ ox})	San Cayetano (Parte Superior)	Esquistos filitiazados, carbonosos, argilitas, calizas	
13		(Parte inferior)	Areniscas, lutitas, argelitas, esquistos filitóideos	

ASOCIACIÓN OFIOLITICA MESOZOICA

14	v		Gabroides, grabos, diabasas, gabrotroctolitas, anortositas	
15	σ		Serpentinitas, harzburguitas, iherzolitas, wherlitas, dunitas serpentinizadas	

Sus aguas minerales fueron muestreadas por primera vez, por investigadores del Instituto de Hidrología y Climatología Médicas (Trelles, 1948) y en años más recientes, por especialistas del MINBAS y otras instituciones pinareñas (Dirección Provincial de Planificación y Empresa Geólogo Minera del MINBAS, 1998).

El yacimiento está asociado al complejo acuífero de la Fm. Esperanza y las aguas emergen a través de las grietas y fracturas del macizo rocoso (Dirección Provincial de Planificación y Empresa Geólogo Minera del MINBAS, 1984), poseen un caudal constante de 0.25 l/s. En la tabla 4 se presentan sus principales propiedades químico-físicas. Clasifican como aguas minerales hipotermales, sulfuradas mixtas (Tab. 5).

En términos de patrones hidroquímicos, la composición química de las aguas corresponde al patrón de tipo 161-136 (Tab. 6; Fig. 1). Aplicando los modelos de balance de masas se obtiene que los principales procesos geoquímicos, que explican la composición química de las aguas del sector son los siguientes: disolución congruente de halita, calcita y dolomita, disolución incongruente de plagioclasa (albita) y oxidación de pirita, con reducción parcial de sulfato (Peña, 2000).

2. Región Montañas de la Sierra de los Organos

Comprende una gran parte de la Sierra de los Organos y se corresponde con la región hidrogeológica Pinar del Río – Soroa – San Cristobal – Artemisa, de la Subregión Guane – San Diego (Tab. 2).

Está ubicada en el sector centro occidental de la provincia, limita al norte con la Llanura Norte de Pinar del Río, al sur y suroeste con la Llanura Sur de Pinar del Río y al este con las Montañas de la Sierra del Rosario. La región ocupa un área de 2 925 km², aproximadamente y se extiende por las porciones meridionales de los municipios Mantua, Minas de Matahambre, Viñales y La Palma, así como por las porciones septentrionales de los municipios Guane, San Juan y Martínez, Pinar del Río y Consolación del Sur.

Desde el punto de vista geológico, la Región constituye un área muy complicada en cuanto a su litología y estilo tectónico. Se caracteriza por un intenso escamamiento y los horizontes inferiores son ocupados por rocas de la Formación San Cayetano, las cuales constituyen un complejo terrígeno fuertemente deformado, constituido por areniscas cuarcíferas, limolitas, pizarras, cuarcitas y algunos paquetes de calizas (Tab. 3a). Sobre este complejo terrígeno se depositaron grandes espesores de calizas de las formaciones Jagua, Guasasa y Artemisa. El complejo terrígeno es de edad Jurásico inferior-superior y el complejo carbonatado de edad Jurásico superior hasta el Paleoceno. Estas secuencias fueron desplazadas y sobrecorridas durante el Eoceno inferior-medio, con la consiguiente formación de olistostromas, fenómeno que se vincula con el sobrecorrimiento de los complejos del arco volcánico Cretácico y las ofiolitas. En toda la región, en el fondo de los valles y en las zonas llanas que rodean a las serranías, se encuentran sedimentos cuaternarios del Pleistoceno (Grupo ensenada Grande), arenas de cuarzo de la Fm. Siguatepeye con intercalaciones de conglomerados y arcillas de la Fm. Guane, del Pleistoceno inferior.

Tabla 4. Principales propiedades físicas y químicas de las aguas minerales sulfuradas de Cuba

No	T (°C)	PH	Eh (mv)	Q (l/s)	TSS (mg/l)	H ₂ S (mg/l)	Tipo hidroquímico
1	24.0		-250.0	0.25	623	17.0	SO ₄ >HCO ₃ -Ca>Mg
2	28.0	7.40		0.3	1530	1.0	SO ₄ -Ca
3	28.0	7.30		0.3	1480	2.5	SO ₄ -Ca
4	31.0	7.40			1193	6.0	SO ₄ -Ca
5	29.0	7.30			1255	7.5	SO ₄ -Ca
6	27.0	7.02			1232	10.0	SO ₄ >HCO ₃ -Ca>Na
7	22.7	7.09	-364.8	2.0	1107	198.9	HCO ₃ >SO ₄ -Na>Ca>Mg
8	23.7	7.36	-317	1.0	1142	21.6	HCO ₃ -Na
9	26.1	7.04	-238	0.6	760	8.1	HCO ₃ >SO ₄ -Ca>Na
10	36.0	7.15	-254	10	1055	4.0	SO ₄ >HCO ₃ -Ca
11	36.0	7.40	-325	0.6-0.8	1407	6.4	SO ₄ -Ca
12	31.0	6.50			2662	27.5	SO ₄ -Ca
13	31.0	7.60	-317	1.0	1531	38.5	SO ₄ -Ca
14	30.0	8.90			1189	23.9	HCO ₃ -Na
15	25.0	7.65			1128	1.0	SO ₄ -Ca
16	25.0	7.50			1882	87.0	HCO ₃ >Cl-Na
17	30.0	7.50			446	1.5	HCO ₃ -Ca>Mg
18	27.0	7.00	-290	3.0	520	15.00	HCO ₃ >Cl-Ca>Mg
19	27.1	7.23	-248		470	7.8	HCO ₃ -Ca
20	27.0	6.88	-235		573	8.6	HCO ₃ -Ca
21	24.8	7.30	-260		675	10.0	HCO ₃ -Ca
22	25.0	6.85			759	10.0	HCO ₃ -Ca
23	28.0	7.30			766	5.9	HCO ₃ -Ca>Na>Mg
24	26	8.04		4.0	1451	2.2	Cl>HCO ₃ -Na
25	25.5	7.89		4.0	1234	1.3	HCO ₃ > Cl -Na
26	26.0	8.32			1426	2.7	Cl>HCO ₃ -Na
27	24.7				4500	15.0	Cl>SO ₄ >HCO ₃ -Na>Ca
28	25.0	7.95			653	5.5	HCO ₃ > SO ₄ -Mg>Ca
29	26.0	7.50			605	2.5	HCO ₃ >Cl-Mg>Na
30	26.0	7.55			472	3.7	HCO ₃ -Mg>Ca
31	26.0	7.0			740.0	6.0	HCO ₃ >SO ₄ -Mg>Ca
32	25.0	7.38			869	6.0	HCO ₃ >SO ₄ -Mg>Ca
33	25.0	8.32			769	14.0	HCO ₃ >Cl -Mg>Na
34	25.0	7.57			593	1.5	HCO ₃ -Mg>Ca
35	40.0	6.50			64200	39.7	Cl-Na
36	51.0	6.80	-303		47074	11.2	Cl-Na
37	40.0	6.50			47404	9.7	Cl-Na
38	41.2	6.29	-276		52801	7.3	Cl-Na
39	35.9	6.45	-266		51500	5.0	Cl-Na
40	40.1	6.53	-248		51500	5.3	Cl-Na
41	35.5	6.51	-93		47645	1.0	Cl-Na
42	36.0	9.25	-66.2	4.1	2007	0.9	Cl-Na
43	36.8	8.75	-269	1.1	1007	0.9	Cl-Na
44	36.0	7.90		1.0	1007	1.0	HCO ₃ - Na>Ca> Mg
45	36.0	8.30		1.0	1995	0.7	Cl-Na
46	30.8	7.01	-205.9		585	1.0	HCO ₃ >SO ₄ -Ca>Na>Mg
47	30.9	7.72	-119.3		590	0.9	HCO ₃ -Ca>Na>Mg
48	30.0	7.50			444	1.2	HCO ₃ -Ca>Mg
49	35.5	7.40			5606	2.6	Cl-Ca>Na

Fuentes (Yacimiento): 1) M. Zequeira (Zequeira); 2) M. El Tigre, 3) M. San Antonio, 4) Pozo P-1, 5) Pozo P-3 (San Vicente); 6) M. Cueva de los Portales (Cueva Portales); 7) Pozo P-55 (El Sitio); 8) M. Sulfuroso (Mil Cumbres); 9) M. Azufre (Cacarajícara); 10) M. El Templado, 11) M. La Gallina, 12) Pozo P-1 (San Diego de los Baños); 13) M-1, 14) Pozo P-4 (Bermejales); 15) M. Azufre (Sal y Cruz); 16) M. Rancho Mar (Rancho Mar); 17) Pozo Azul (Pozo Azul); 18) M. Cercano al Balneario (Soroa); 19) M. Pozo Brocal, 20) M. San Juan Sulfuroso (Las Terrazas); 21) M. Pedernales, 22) M. La Pastora (Cayajabos); 23) M. Martín Mesa (Martín Mesa); 24) M. La Pila, 25) M. La Mina; 26) Pozo P-1, (Santa María del Rosario); 27) Canal de Aguas Minerales (Cantel); 28) M. La Pila -M-12, 29) M. El Sulfuroso (M-27), 30) M. Copey (Madruga); 31) M-2.; 32) Pozo PH-12 A -San Miguel ; 33) Pozo P-16 -La Paila, 34) PH-10 - El Vivero (San Miguel de los Baños); 35) M. Menéndez - MN-5 Menéndez; 36) M. El Guapo, 37) M. El Suave, 38) M. Carabaña, 39) M. Hongos, 40) M. Garganta, 41) M. Belleza (Elguea); 42) M. del Chorrillo, 43) M. Piscina Grande del Gimnasio, 44) Pozo PB-4, 45) Pozo PC-5 (Ciego Montero); 46) M. El Chorrillo, 47) M. Piscina Termal, 48) Mn-1 (San José de los Lagos); 49) Pozo CQ-3 (La Cuquita).

Tabla 5. Tipos de aguas minerales sulfuradas y patrones hidrogeoquímicos

No	Clasificación (aniones)	Tipo hidroquímico	Patrón hidrogeoquímico	Yacimientos	No
4	Bicarbonatadas cálcicas	HCO ₃ -Ca	181-181	Las Terrazas, Cayajabos	4
4	Bicarbonatadas sódicas	HCO ₃ -Na	811-181	Bermejales	1
			721-172	Mil Cumbres	1
		HCO ₃ >Cl-Na	811-271	Rancho Mar	1
			811-451	Santa María Rosario	1
16	Bicarbonatadas mixtas	HCO ₃ -Ca>Mg	163-181	Pozo Azul, San José Lagos	2
			163-271	Soroa	1
			127-181	San Miguel Baños	1
			316-271	Madrugá	1
			415-361	San Miguel Baños	1
			451-163	Cacarajicara	1
			136-163	Madruga, San Miguel Baños	2
					127-172
			352-181	Martín Mesa	1
					352-271
			532-271	Ciego Montero	1
			352-172	San José Lagos	1
532-172	El Sitio	1			
9	Sulfatadas cálcicas	SO ₄ -Ca	181-118	San Vicente, San Diego Baños	6
			271-118	Bermejales	1
			172-127	Sal y Cruz	1
		271-127	San Diego Baños	1	
2	Sulfatadas mixtas	SO ₄ >HCO ₃ -Ca>Mg	163-136	Zequeira	1
			361-127	Cueva Portales	1
12	Cloruradas sódicas	Cl-Na	811-111	Menéndez, Elguea, Ciego Montero	10
			811-631	Santa María Rosario	1
					811-541
2	Cloruradas mixtas	Cl-Ca>Na	451-811	La Cuquita	1
			721-523	Cantel	1

Yacimiento San Vicente

El yacimiento se localiza en el municipio Viñales, exactamente en el centro turístico conocido con el nombre de Rancho San Vicente. Las coordenadas de su centro son: X: 221 000, Y: 317 400.

En este yacimiento emerge un grupo de manantiales, principalmente en San Vicente (municipio de Viñales). La zona de alimentación de estos últimos corresponde a calizas estratificadas de la Fm. Jagua de edad Jurásico superior – Cretácico inferior y la Fm. Guasasa, del Jurásico medio (Tab. 3a).

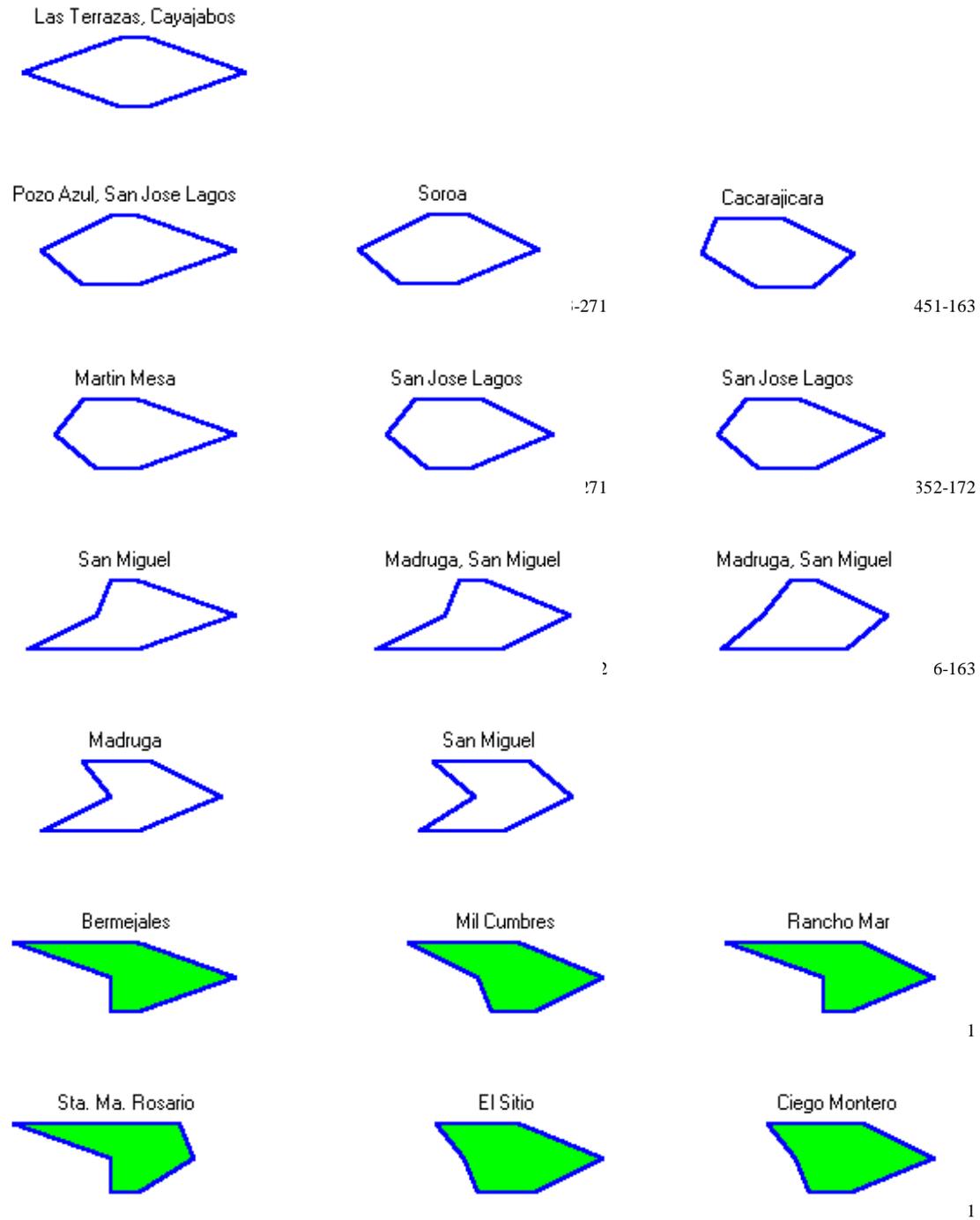
En San Vicente existe una instalación balneológica con 4 manantiales con caudales entre 0.2 – 0.9 l/s (Erguerov y Luge, 1967), los que antiguamente fueron nombrados: El Tigre, a Salud, San Antonio y El Templado (Trelles, 1948), así como varios pozos perforados durante los trabajos de búsqueda y exploración geológica (Peláez et al, 1991): Pozos P 1, P 3, etc., cuyas aguas son de composición muy similar. Como ejemplo representativo de las mismas tomaremos, tomaremos los manantiales El Tigre y San Antonio y los pozos P 1 y P 3 (Tab. 3). Las aguas de estas fuentes son de tipo mineral, hipotermal, sulfuradas sulfatadas cálcicas, de reacción alcalina (Tab. 5).

El patrón hidrogeoquímico de las aguas sulfuradas de San Vicente es 181-118 (Tab. 6; Fig. 1). Su composición se explica mediante los procesos geoquímicos de: disolución congruente de halita, calcita y dolomita, disolución incongruente de plagioclasa (albita), oxidación de pirita y reducción parcial de sulfato (Peña, 2000). Dichos procesos son coherentes con la composición mineralógica de las calizas de la Formación Guasasa (Furet et al, 1988) y la fuente del sulfato está relacionada con el mineral pirita. La presencia de H₂S, en las aguas se debe a la reducción anaeróbica parcial del sulfato, en forma similar a como ocurre en la fuente Azufre de Zequeira.

PATRONES HIDROGEOQUIMICOS

Na+K		Cl
Ca		HCO ₃ +CO ₃
Mg		SO ₄

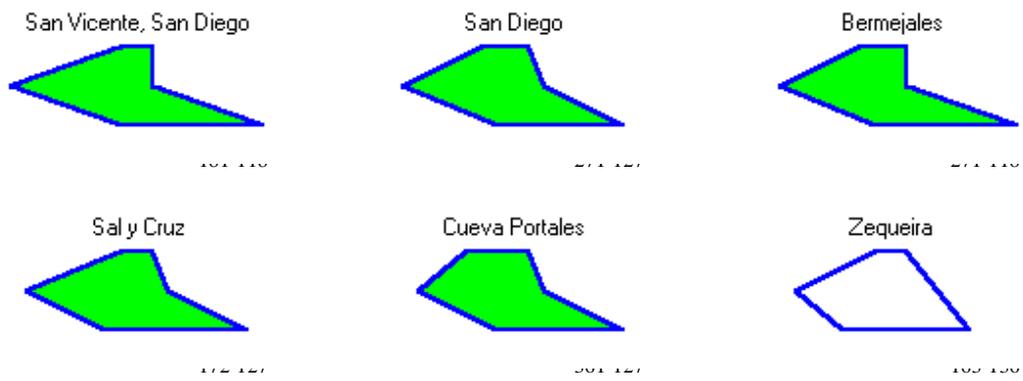
Bicarbonatadas



PATRONES HIDROGEOQUIMICOS

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

Sulfatadas



Cloruradas

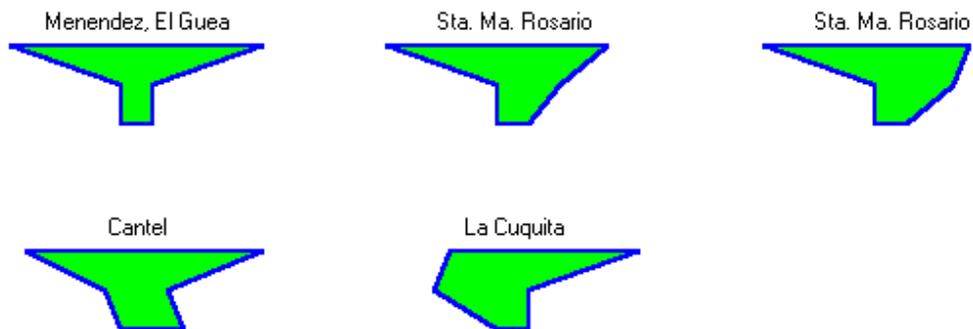


Tabla 6. Grupos balneológicos correspondientes a las aguas minerales sulfuradas estudiadas

No Grupos	Grupos Balneológicos	Yacimiento	No fuentes
1	Sulfuradas, cloruradas sódicas, bromo-yoduradas, silícicas, boratadas, hipertermales	Menéndez	1
2	Sulfuradas, cloruradas sódicas, bromo-yoduradas, hipertermales	Elguea	4
	Sulfuradas, cloruradas sódicas, bromo-yoduradas, mesotermales	Elguea	2
3	Sulfuradas, cloruradas sódicas, mesotermales	Ciego Montero	3
4	Sulfuradas, cloruradas mixtas, silícicas, fluoradas, boratadas, báricas, estróncicas, hipotermales	La Cuquita	1
5	Sulfuradas, cloruradas mixtas, radónicas, carbónicas, ferruginosas, silícicas, fluoradas, boratadas, báricas, estróncicas, hipotermales	Cantel	1
6	Sulfuradas, cloruradas sódicas, silícicas, hipotermales	Santa María Rosario	2
7	Sulfuradas, sulfatadas cálcicas, fluoradas, ligeramente radónicas, mesotermales	San Diego Baños	2
8	Sulfuradas, sulfatadas cálcicas, hipotermales	San Vicente	4
		San Diego Baños	1
		Bermejales	1
		Sal y Cruz	1
9	Sulfuradas, sulfatadas mixtas, hipotermales	Cueva Portales	1
10	Sulfuradas, bicarbonatadas sódicas, silícicas, hipotermales	Santa María Rosario	1
11	Sulfuradas, bicarbonatadas sódicas, hipotermales	Mil Cubres	1
		Rancho Mar	1
		Bermejales	1
12	Sulfuradas, bicarbonatadas mixtas, mesotermales	Ciego Montero	1
	Sulfuradas, bicarbonatadas mixtas, hipotermales	El Sitio	1
13	Sulfuradas cálcicas, hipotermales	Las Terrazas	2
		Cayajabos	2
14	Sulfuradas mixtas, silícicas, hipotermales	Madruga	3
		San Miguel Baños	4
15	Sulfuradas mixtas, hipotermales	Zequeira	1
		Cacarajícara	1
		Pozo Azul	1
		Soroa	1
		Martín Mesa	1
		San José lagos	3

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 aflora una fuente de aguas minerales, que se encuentra ubicada en la 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. (Tab. 3a). (Nuevo Atlas Nacional de Cuba, 1988).

Las principales características químico – físicas del manantial que emerge en este lugar se muestran en la tabla 4. 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. La composición química de estas aguas, de acuerdo al modelo de balance de masas se explica mediante los siguientes procesos geoquímicos: disolución congruente de halita, calcita y dolomita, disolución incongruente de albita, oxidación de piritita y reducción de sulfato. La justificación de tales procesos coincide con la dada para el sector San Vicente.

3. Región de las Montañas de la Sierra del Rosario

Esta región se encuentra ubicada en el sector centro-oriental de la provincia de Pinar del Río. Limita al norte con la Llanura Norte de Pinar del Río, al sur con la Llanura Sur de Pinar del Río, al oeste por las Montañas de la Sierra de los Órganos y al este con la región de Llanuras y Alturas del Norte de la Habana-Matanzas (Tab. 2). El territorio montañoso ocupa aproximadamente 1 125 km² y comprende los municipios pinareños de La Palma, Bahía Honda, Los Palacios, San Cristóbal, Candelaria y el municipio habanero de Artemisa (Gutiérrez y Glean, 1999).

La geología de la Sierra del Rosario se caracteriza por una complejidad litológica (Tab. 3a) y estructural, como consecuencia del desplazamiento y transporte tectónico de rocas ocurrido durante el Eoceno Medio. 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). Esta disposición estructural condiciona la formación de un relieve cársico (cokpitkarst), diferente a la de la Sierra de los Organos, donde es más típica la morfología de mogotes (karren karst). Desde el punto de vista hidrogeológico, en la Región, se pueden distinguir varios sistemas de acuíferos (Rodríguez et al, 1989; Fagundo et al, 1993; Llerena, 2000): a) Complejo acuífero de las rocas efusivo-sedimentarias (Cretácico); b) Complejo acuífero asociado a las rocas ultrabásicas (Mesozoico), c) Complejo acuífero asociado a materiales terrígeno-carbonatados del Paleógeno; d) Sistema acuífero desarrollado de las calizas del Cretácico; e) Zona de las aguas minerales y f) Complejos acuíferos asociados a las pizarras y esquistos arcillo arenosos (Jurásico-Cretácico).

- a) El complejo de rocas terrígenas de tipo efusivo sedimentarias se encuentra localizado en la parte Norte de la Sierra del Rosario. En este complejo de rocas se originan cursos superficiales y acuíferos cuyas aguas son del tipo bicarbonatadas sódicas o cálcicas sódicas con mineralización entre 0,5 y 1 g/l. Esta constituido por aleurolitas, argilitas, areniscas, lavas basálticas andesíticas, calizas y margas de las formaciones Vía Blanca y Encrucijada.
- b) El complejo de rocas ultrabásicas está compuesto por serpentinitas, harzburgitas y otras rocas serpentinizadas de edad Cretácico. Originan corrientes superficiales y acuíferos en fisura, cuyas aguas son del tipo bicarbonatadas magnesianas con mineralización del orden de 300 mg/l. Estas rocas están distribuidas por toda la Sierra del Rosario, aunque el macizo de mayor elevación se encuentra en el vertiente Norte.

- c) El complejo de rocas terrígenos carbonatadas del Paleógeno, por sus características poco permeable por encontrarse intercaladas entre calizas, constituyen parte-aguas de las cuencas hidrográficas y vías de conducción autóctonas de cursos superficiales de los sistemas cársicos. No forman sistemas de acuíferos importantes aunque si pueden rendir aguas minerales con poco caudal. Por su naturaleza poco permeable condiciona la acumulación de aguas en los sedimentos carbonatados intercalados o que la sobreyacen.
- d) El complejo de calizas del Cretácico está representado principalmente por calizas masivas organógenas (Formaciones Guajaibón y Sierra Azul) y calizas de estratos finos (Formación Artemisas). También forman parte de este complejo calcarenitas, aleurolitas y otras rocas. Las aguas de esta unidad hidrogeológica son del tipo bicarbonatadas cálcicas con mineralizaciones que oscilan entre 0.3 a 0.6 /l, en dependencia de las características texturales de la roca o del contenido de CO₂ y del tiempo de contacto entre el agua y las calizas.
- e) 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.

Las secuencias de la Formación San Cayetano (edad Jurásico), constituidas por esquistos, pizarras y areniscas, forman parte de las capas impermeables de los yacimientos de aguas minerales. La Formación San Cayetano está representada en el área de estudio por areniscas con intercalaciones de aleurolitas y con escasas intercalaciones de calizas.

A continuación se relacionan los principales yacimientos de aguas minerales sulfuradas de esta región:

- a) El Sitio (municipio La Palma)
- b) Mil Cumbres (municipio La Palma)
- c) Cacarajícara (municipio Bahía Honda)
- d) San Diego de los Baños (municipio Los Palacios)
- e) Bermejales (municipio Los Palacios)
- f) Sal y Cruz (municipio San Cristobal)
- g) Pozo Azul (municipio San Cristobal)
- h) Rancho Mar (municipio San Cristobal)
- i) Soroa (municipio San Candelaria)
- j) Las Terrazas (municipio San Candelaria)
- k) Cayajabos (municipio Artemisa)

El estudio hidroquímico de las aguas de estos yacimientos, agrupados por los correspondientes sectores, ha sido reportado recientemente en los trabajos de González et al (2001), Peña (2000), Llerena (2001) y Llerena et al (2001).

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.

El acuífero está relacionado con los depósitos de la Fm. Artemisa, constituidos por calizas estratificadas. Por encima de estos sedimentos se presenta la secuencia olistostrómica o de mezcla de la Fm. Manacas (Tab. 3a), constituida por serpentinitas, gabros y zonas de brecha. Las aguas del pozo P - 55 brotan con un caudal aproximado de 2 l/s (Dirección Provincial de Planificación y Empresa Geólogo Minera del MINBAS, 1998). Sus aguas clasifican como: minerales hipotemales, sulfuradas bicarbonatadas sulfatadas mixtas, con reacción neutra (Tab. 5).

En términos de patrones hidroquímicos, la composición química de las aguas corresponde al patrón de tipo 532 -181 (Tab. 6; Fig. 1). El origen de la composición química de estas aguas, determinado mediante balance de masas, se explica por procesos de disolución incongruente de plagioclasas (anortita 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 aluminosilicatos, son más solubles a temperaturas altas (propias de los drenajes profundos) y a bajos o altos valores de pH (Appelo y Postma, 1993).

Yacimiento Mil Cumbres

El yacimiento se localiza en el municipio La Palma, dentro del Área Protegida Mil Cumbres. En una zona de alturas de pizarras donde predominan los pastizales y algunas plantaciones forestales. Las coordenadas de su centro son: X: 254 700, Y: 326 850.

En el área de la manifestación afloran depósitos de la Fm. Artemisa, compuestos por calizas de color gris oscuro con intercalaciones de lutitas y areniscas (Tab. 3a). Por encima de esta formación aparecen secuencias olistostrómicas de la Fm. Manacas, constituida por bloques de diversa composición, gabros, basaltos, serpentinitas, diabasas, bloques de calizas, etc. El sector está intensamente afectado por el tectonismo (Peña, 2000).

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).

En la tabla 4 se muestran las principales propiedades químico-físicas de las aguas de este yacimiento. Clasifican como minerales hipotemales, sulfuradas bicarbonatadas sódicas, con reacción alcalina (Tab. 5).

La composición química de estas aguas corresponde al patrón hidroquímico de tipo 721 - 172 (Tab. 6; Fig. 1), correspondiente a un agua de tipo aguas bicarbonatadas sódicas. El origen de dicha

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. Cascarajícara Sierra Azul y Lucas (Tab. 3a), constituidos principalmente por calizas, aegilitas, brechas, calcarenitas y calcilitas (Academia de Ciencias de Cuba, 1989).

Las 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 (Tab. 4). Las aguas clasifican como minerales hipotemales, sulfuradas mixtas, con reacción neutra (Tab. 5).

El patrón hidroquímico de estas aguas es de tipo 451 – 163 (Tab. 6; Fig. 1). 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). Aunque tales procesos son totalmente lógicos y se corresponden con los reportados en otros sectores, donde las calizas son predominantes, no existe información sobre la composición mineralógica de estas rocas.

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.

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 y hacia el Norte y Oeste un relieve, vegetación y fauna con altos valores perceptuales (Peña, 2000) a 4 Km de este sector se encuentra el Centro Turístico “La Güira”.

Se explotan en la actualidad 3 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 Alvatez-Nodarse y Moresno (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 (Peláez et al, 1990).

La geología de la región está representada por los sedimentos terrígenos de la Fm. San Cayetano y Francisco, así como los depósitos carbonatados de la Fm. Artemisa. En la porción sur del yacimiento se encuentran las secuencias flicschoides de las Fm. Capdevila (Tab. 3a).

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.

Los datos de las propiedades químico-físicas de las principales fuentes de este yacimiento se presentan en la tabla 4. Existen básicamente dos tipos de aguas minerales (Tab. 5): 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 (Tab. 6; Fig. 1). 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.

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.

Las aguas minerales están asociadas a las calizas agrietadas y carsificadas de la Fm. Artemisa (Tab. 3a) y surgen a la superficie del terreno en forma de manantiales ascendentes, aprovechando para ello zonas tectónicas de mayor permeabilidad.

Entre las fuentes más interesantes se pueden citar el manantial M 1 y el Pozo P 4 (Tab. 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 (Tab. 5).

Los patrones hidrogeoquímicos de esta agua son de los tipos 271-118 y 811-118 respectivamente (Tab. 6; Fig. 1). 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 Cristobal, al noroeste de ese pueblo y a 5 km del caserío de Franciso, 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, tal como se muestra en la tabla 4, 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, 1974). Estas aguas clasifican como minerales hipotermales, sulfuradas sulfatadas cálcicas, de reacción alcalina (Tab. 5) y el patrón hidrogeoquímico es 172-127 (Tab. 6; Fig. 1).

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.

Desde el punto de vista geológico el sector Pozo Azul se ubica en los depósitos de la parte meridional de la Sierra del Rosario. El corte estratigráfico en el área está representado por los depósitos carbonatados de la Fm. Artemisa y Polier con un predominio de la primera (Tab. 3a). El corte calcáreo está compuesto por calizas con intercalaciones de lutitas y pedernales. En el sector se observa un desarrollo intenso de las estructuras tectónicas disyuntivas y plicativas asociadas a movimientos de sobrecorrimientos (Academia de Ciencias de Cuba, 1989).

En el sector alumbran 3 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, cuyas principales propiedades químico-físicas se muestran en la tabla 4. Clasifican como: Aguas minerales, hipotermales, sulfuradas mixtas, con reacción alcalina (Tab. 5).

En términos de patrones hidroquímicos, la composición de las aguas corresponde al patrón de tipo 163 – 181 (Tab. 6; Fig. 1). 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.

Las características geológicas del sector se identifican con las estructuras regionales de la Sierra del Rosario donde se aprecia un escamamiento tectónico formado por planos de sobrecorrimientos. En el área están ampliamente propagados los sedimentos de las formaciones Artemisa (Jurásico superior Cretácico inferior₁) y Polier de edad Cretácico, constituidos por calizas y micritas con intercalaciones de areniscas y argilitas (Tab. 3a). Están presentes también en el sector rocas vulcanógenas sedimentarias de la Fm. Sábalo (Jurásico superior), representadas por diabasas, basaltos y cuerpos de gabros intercalados con rocas sedimentarias (Academia de Ciencias de Cuba, 1989).

Las características hidrogeológicas del sector son complejas y están dadas por la interrelación existente entre los diferentes tipos de sedimentos y formaciones geológicas.

En este yacimiento existe un manantial de agua minero-medicinal. El caudal aproximado del mismo es de 2 l/s (Dirección Provincial de Planificación y Empresa Geólogo Minera del MINBAS, 1948). Las propiedades químico-físicas de las aguas se exponen en la tabla 4. Las mismas clasifican como minerales hipotermales, bicarbonatadas cloruradas sódicas, de reacción alcalina (Tab. 5).

La composición química de las aguas corresponde al patrón de tipo 811 – 271 (Tab. 6; Fig. 1). Dicha composición puede explicarse, fundamentalmente, a partir de los siguientes procesos geoquímicos: disolución congruente de halita y serpentina, disolución incongruente de plagioclasa (albita y anortita), oxidación de piritita 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.

En el área afloran exclusivamente depósitos pertenecientes a las secuencias septentrionales de la Sierra del Rosario, donde están ampliamente propagados los depósitos de la Fm. Sábalo (Jurásico superior), representada por un corte vulcanógeno sedimentario compuesto por basaltos y diabasas con intercalaciones de calizas, lutitas y areniscas (Tab. 3a). Concordante con estos depósitos aflora el corte carbonatado-terrágeno de las formaciones Artemisa (Jurásico superior Cretácico inferior) y Polier (Cretácico inferior). (Academia de Ciencias de Cuba, 1989).

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 3 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).

Las principales propiedades hidroquímicas de estas aguas se resumen en la tabla 4. Las mismas clasifican como minerales, hipotermales, sulfuradas mixtas, con reacción neutra (Tab. 5).

En términos de patrones hidroquímicos, la composición química de las aguas corresponde al patrón de tipo 163 – 271 (Tab. 6; Fig. 1). 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 piritita 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.

El yacimiento está ubicado en la Sierra del Rosario. Las surgencias principales se localizan en márgenes de los ríos San Juan y Bayate y se encuentran relacionadas con las calizas de la Fm. Artemisa (Jurásico superior Cretácico inferior), las rocas ultrabásicas serpentinizadas de la asociación ofiolítica, las areniscas de la Fm. Manacas, de edad Paleógeno y las rocas terrígenas de la Fm. San Cayetano del Jurásico inferior (Tab. 3a; Nuevo Atlas Nacional de Cuba, 1988).

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. Las principales características de su composición se expresan en la tabla 4. Dichas aguas clasifican como minerales, hipotermales, sulfuradas cálcicas, con reacción neutra (Tab. 5).

En términos de patrones hidroquímicos, la composición química de las aguas corresponde al patrón de tipo 181 – 181 (Tab. 6; Fig. 1). La composición química de esta agua 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 (Tab. 3a).

Las propiedades químico-físicas de una de las aguas representativas de este yacimiento se presentan en la tabla 4. Las mismas clasifican como minerales, hipotermales, sulfuradas cálcicas, con reacción neutra (Tab. 5).

Su patrón hidrogeoquímico es de tipo 181 – 181 (Tab. 6; Fig. 1). Los cálculos del balance de masas, 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.

4. Región Llanuras y Alturas del Norte de La Habana Matanzas

Esta región limita al norte con las aguas del océano Atlántico, al sur con la Llanura Ariguanabo-Almendares-San Juan, al este con la llanura de Colón y al oeste con las Montañas de la Sierra del Rosario. Posee una superficie de 2 025 km² y se extiende desde el Mariel hasta Matanzas (Gutiérrez y Glean, 1999). Esta región natural se corresponde con dos regiones hidrogeológicas: Habana – Matanzas y Artemisa -Bolondrón – Aguada de Pasajeros (Tab. 2).

Región hidrogeológica: Habana – Matanzas

Esta región hidrogeológica se corresponde con la zona de llanuras litorales de la Región Natural (Tab. 2). Está formada en rocas del Neógeno y el Cuaternario, constituidas por calizas arrecifales y calcarenitas (Tab. 3b). En la misma brotan numerosos manantiales de aguas minerales: Martín Mesa (en las proximidades del Mariel), La Cotorra, San Agustín, etc. (Guanabacoa), Pocitos (Marianao), Tarará, Bajurayabo y otros (Habana del Este) y Santa María del Rosario (Cotorro). De ellos, los primeros y los últimos son de carácter sulfurado.

Yacimiento Martín Mesa

Se encuentra ubicado entre Artemisa y el Mariel (coordenadas X: 327 000, Y: 352 000), donde existe un antiguo centro balneológico que se utilizaba con fines terapéuticos. Sus aguas con una mineralización inferior a 1 g/l poseen, sin embargo, relativamente altos contenidos de sulfuros los cuales le confieren, entre otros componentes, sus propiedades beneficiosas a la salud.

El origen de dichas aguas es meteórico y se relaciona con la infiltración y lixiviación de los minerales que componen los sedimentos de la Fm. Martín Mesa (Cretácico), constituidos por calizas masivas y estratificadas (biomicritas) y calcarenitas (Tab. 3b; Academia de Ciencias de Cuba, 1989). La emisión es a través de las grietas asociadas a las fallas locales.

Las principales propiedades hidroquímicas de esta agua se muestran en la tabla 4. Clasifican como minerales, hipotermales, sulfuradas mixtas, con reacción neutra (Tab. 5) y el patrón hidrogeoquímico es de tipo 352-181 (Tab. 6; Fig. 1).

Tabla 3b. Formaciones geológicas y litología de las regiones relacionadas con los yacimientos de aguas minerales sulfuradas. Llanuras y Alturas de La Habana Matanzas

No	Edad (Símbolo)	Formación	Composición	Yacimiento
1	Neógeno (N_1^{1-2})	Güines	Calizas biógenas, calizas detríticas, dolomitas	
2	Neógeno (N_1^{1-2})	Caobas	Calculutitas, calizas arcillosas	
3	Neógeno (N_1^{1-1})	Husillo	Calizas biógenas	
4	Paleógeno (P_2^2)	Peñón	Brechas, conglomerados, calizas	
5	Paleógeno (P_2^{1-2})	Nazareno	Calizas arcillosas, margas, aleurolitas	
6	Paleógeno (P_2^{1-2})	Perla	Margas, calcarenitas	
7	Paleógeno (P_2^1)	Capdevila	Areniscas, aleurolitas, conglomerados	
8	Paleógeno (P_1)	Gp Vívora	Areniscas, conglomerados, arcilla, margas, calizas	
9	Cretácico inferior (K_2cp-m)	Vía Blanca	Aleurolitas y argilitas, margas, conglomerados, horizontes de olistostromas	Santa María del Rosario Madruga San Miguel de los Baños
10	Cretácico inferior ($K_{1-2} al-cm$)	Chirino	Tufitas, andesitas, basaltos, radiolaritas, pedernales, calizas	Cantel
11	Cretácico inferior (K_{1-2})	Martín Mesa	Calizas, calcarenitas, arenas cuarzosas, pizarras calcáreo arcillosas	Martín Mesa
ASOCIACIÓN OFIOLÍTICA MESOZOICA				
12	v		Gabroides, grabos, diabasas, gabrotroctolitas, anortositas	
13	σ		Serpentinitas, harzburguitas, iherzolitas, wherlitas, dunitas serpentinizadas	Madruga San Miguel de los Baños

Yacimiento Santa María del Rosario

El sitio es célebre por la existencia de un balneario con fines terapéutico, que en la actualidad se encuentra en mal estado y requiere de un proceso inversionista para su reactivación. Está situado en el pueblo del Cotorro y sus coordenadas son: X: 371 300, Y: 359 500.

La constitución geológica del territorio donde se encuentra este yacimiento, está representada por depósitos poco permeables del Cretácico superior y sedimentos de tipo aluminosilicatos del Paleógeno (Tab. 3b). En los flancos afloran rocas del Neógeno. Los sedimentos cretácicos están constituidos por areniscas, arcillas, esquistos arcillosos, margas y calizas. Las rocas del Paleógeno, están formadas por areniscas, arcillas frecuentemente esquistosas, calizas; así como intrusiones de serpentinitas. En general la permeabilidad de las rocas cretácicas es baja. Los sedimentos del Mioceno son por el contrario, de gran acuosidad y están constituidos por calizas (Vega et al, 1992).

En el yacimiento hay dos tipos de aguas minerales: el primero, representado por un agua de mesa con mineralización de 1.3 a 1.5 g/l y caudal de 4 l/s, mientras el segundo, utilizado con fines terapéuticos, posee una mineralización de 1.8 a 1.9 g/l y un caudal de 1 g/l (Alvarez-Nonarse y Moreno, 1996). Las propiedades de algunas fuentes representativas de aguas minerales sulfuradas se presentan en la tabla 4.

Desde el punto de vista balneológico existen dos tipos principales de aguas minerales: hipotermales, sulfuradas bicarbonatadas cloruradas sódicas, silícicas, con reacción alcalina e hipotermales sulfuradas cloruradas sódicas, silícicas, con reacción alcalina (Tab. 5). Los patrones hidrogeoquímicos son: 811-631, 811-451 y 811-541 respectivamente (Tab. 6; Fig. 1).

Región hidrogeológica Bolondrón – Aguada de Pasajeros

Este territorio se corresponde con las alturas de la Región Natural (Tab. 2). Estas elevaciones están constituidas por rocas carbonatadas representadas por margas, margas calcáreas y margas silificadas de edad Paleógeno (Eoceno inferior hasta el superior); así como calizas, calizas arcillosas y margas del Mioceno y Plioceno (Tab. 3b). A lo largo del territorio afloran también serpentinitas, gabros y otras rocas de la asociación ofiolítica. En esta región hidrogeológica alumbran los manantiales de Madruga y San Miguel de los Baños, ambos con aguas minerales sulfuradas.

Yacimiento Madruga

En las proximidades del pueblo de Madruga (Coordenadas X: 410 400, Y: 343 150), a una cota de 145 m, brotan una serie de manantiales de aguas minerales con temperaturas cercana a 26 °C, una mineralización entre 0.5 y 0.7 g/l, de tipo bicarbonatadas cloruradas magnesianas o mixtas, sulfuradas y silícicas (Tab. 4). También existen una serie de pozos que fueron perforados recientemente durante los trabajos de prospección geológica realizados en el territorio. Estas aguas se explotan desde hace muchos años con fines terapéuticos y actualmente se hacen esfuerzos por parte del gobierno municipal para reactivar la instalación balneológica.

La geología de este yacimiento es similar a la del de San Miguel de los Baños y la misma será reseñada con posterioridad (Tab. 3b).

En la tabla 4 se muestran las principales propiedades químico-físicas de las aguas de algunas de las fuentes representativas del yacimiento. Las mismas clasifican como minerales, hipotermales, sulfuradas mixtas, silícicas, con reacción alcalina (Tab. 5). Los patrones hidrogeoquímicos son 136-163, 351-271 y 127-172 (Tab. 6; Fig. 1).

Yacimiento San Miguel de los Baños

El yacimiento se encuentra ubicado junto al pueblo del mismo nombre. En el mismo se distinguen tres sectores con aguas minero medicinales, los cuales se relacionan a continuación:

- a) Sector San Miguel de los Baños. Coordenadas X: 466 600, Y: 337 000
- b) Sector El Vivero: Coordenadas X: 467 400, Y: 336 000
- c) Sector El Vivero: Coordenadas X: 463 400, Y: 335 000

Las aguas minero-medicinales de San Miguel de los Baños se conocen desde hace más de un siglo. Sin embargo, su auge se alcanzó a partir de 1928 en que fue construido el Hotel – Balneario San Miguel. A partir de 1964 la actividad balneológica comienza a declinar, al deteriorarse sus instalaciones y disminuir la actividad turística.

Como parte de la política de rescate del termalismo llevado a cabo por el MIMBAS y otras instituciones a partir de 1984, se realizaron en el área trabajos de prospección geológica detallados (Rojas et al, 1999: Rojas et al, 1995), los que permiten determinar el potencial existente, tanto con fines terapéuticos como para bebida envasada. Además de estos trabajos, varias empresas y Corporaciones extranjeras impulsaron estudios encaminados a evaluar la posible utilización y explotación de las aguas de San Miguel con fines turísticos y balneológicos (KOMEX International LTD, 1995; Canada Northwest Energy Limited, 1995; Romero, Moreno y Rocamora, 1998, Moreno, 1999).

Los estudios geológicos e hidrogeológicos efectuados en el yacimiento de San Miguel de los Baños (Rojas et al, 1999: Rojas et al, 1995) pusieron de manifiesto la presencia de cuatro tipos de litologías (Tab. 3b):

- a) Rocas de la asociación ofiolítica, las cuales ocupan la parte basal del yacimiento. Se componen de serpentinitas y en menor grado de diabasas y gabrodiabasas.
- b) Sedimentos vulcanógenos de edad cretácica (Fm. Vía Blanca), constituidos por conglomerados areniscas, aleurolitas y argilitas de composición vulcanomíctica – tobácea, así como ocasionalmente capas de tobas.
- c) Rocas terrígeno – carbonatadas del Paleógeno, constituidas por calizas y dolomitas de las formaciones Husillo, Nazareno y Perla.
- d) Rocas representadas por carbonatos (calizas y dolomitas) de las formaciones Peñón (Paleógeno) y Güines (Neógeno).

Con relación a las aguas minerales, son de interés los complejos acuíferos asociados a las rocas ultrabásicas y las rocas vulcanógenas del Cretácico. En el contacto entre estos dos tipos de rocas aparecen las denominadas listvenitas, las cuales se originaron como resultado de los movimientos de sobrecorrimento y posteriores procesos hidrotermales y metasomáticos. En estas rocas están presentes los minerales calcita, dolomita, serpentinita, cuarzo, piritita y cromita. Precisamente, asociadas a las listvenitas, se encuentran las aguas minero medicinales de San Miguel de los Baños.

El caudal de estas aguas es del orden de 1 g/l (Alvares – Nodarse y Moreno, 1996). Las principales características de las aguas minerales sulfuradas representativas del yacimiento se ilustran en la tabla

4. Dichas aguas clasifican en forma similar a las del yacimiento Madruga (Tab. 5) y poseen patrones hidrogeoquímicos parecidos (136-163, 127-172, 415-361 y 316-217), tal como se observa en la tabla 6 y la figura 1.

Región hidrogeológica Cárdenas San José

La región está situada en la parte norte de Matanzas. Limita al norte con la bahía de Cárdenas, al sur con la divisoria de las aguas subterráneas en dirección San Miguel – Los Arabos.

En la constitución geológica de la misma toman parte sedimentos cretácicos, eocénicos y rocas ultrabásicas (Tab. 3b), las cuales se distribuyen por las elevaciones pequeñas del territorio, mientras que en la zona llana afloran sedimentos del Oligoceno y el Mioceno. La acuosidad de las rocas es escasa, excepto las del Neógeno (Stout et al, 1991).

El territorio se caracteriza por la presencia de una estructura de mogotes, pliegues y sobrecorrimientos, diseccionada por fallas, donde se distribuyen diversas litologías. Están presentes distintas secuencias estratigráficas, correspondientes a unidades tectónicas sobrecorridas unas sobre otras. A continuación se describen estas secuencias:

Las rocas basales son de constitución ultrabásica, acompañadas de gabros y diabasas, así como tobas e intrusiones de diferente composición (Fm. Chirino del Cretácico inferior).

Discordantes sobre estas rocas afloran las secuencias flychoides de la Fm. Vía Blanca de edad Cretácico inferior, constituidas por areniscas, a veces calcáreas y silíceas, aleurolitas, argilitas, gravelitas y tufitas.

Con discordancia angular, sobreyacen sobre las anteriores, los depósitos de las formaciones paleocénicas Loma de Triana, Cojimar, así como las formaciones Güines y Colón del Neógeno – Cuaternario.

Yacimiento Cantel

Se encuentra ubicado en el sector Cantel. Sus coordenadas son: X: 465 400; Y: 359 000.

En este sitio se realizó un trabajo detallado de prospección geológica (Stout et al, 1991). La fuente de agua minero – medicinal más importante fue muestreada en el denominado Manantial Canal de Aguas Minerales, cuyas propiedades hidroquímicas se muestran en la tabla 4.

El Manantial Canal de Aguas Minerales, representativo de este yacimiento, posee un gran número de componentes especiales tales como CO₂, Rn, Fe, H₂SiO₃, HBO₃ y Ba además de H₂S. Estas aguas, con un patrón hidrogeoquímico 721-523 (Tab. 6; Fig. 1), clasifican como minerales, hipotermales, sulfuradas, cloruradas mixtas, carbónicas, radónicas, ferruginosas, silíceas, fluoradas, boratadas, estróncicas y báficas (Tab. 5).

5. Región natural Llanura Corralillo Yaguajay

Se extiende a lo largo de la costa norte de las provincias de Villa Clara, Sancti Spíritus y parte de Ciego de Avila, hasta alcanzar la zona de punta Alegre (Tab. 2), donde la corrosión de un domo salino permite la observación de formas cársicas yesíferas (Gutiérrez y Glean, 1999).

La región ocupa los territorios de los municipios Martí (Matanzas), Corralillo (Villa Clara), Yaguajay (Sancti Spíritus) y Chambas (Ciego de Avila). Esta región natural se corresponde con la región

hidrogeológica denominada Parte Noroeste de las provincias Villa Clara y Parte Norte de las provincias Sancti Spíritus – Camagüey (actualmente incluye a Ciego de Avila).

La estructura geológica de la región está constituida por sedimentos carbonatado – terrígenos de edades Cretácico hasta el Paleoceno (Tab. 3c). Una parte considerable está compuesta por sedimentos calcáreos de cobertura, enmascarados a su vez por depósitos arenosos, arcillosos, gravosos y de calizas del Cuaternario y el Holoceno. En este territorio brotan las aguas mineromedicinales de los siguientes yacimientos:

- a) Menéndez (municipio Martí, provincia de Matanzas)
- b) Elguea (Municipio Corralillo, provincia de Villa Clara)

Tabla 3c. Formaciones geológicas y litología de las regiones relacionadas con los yacimientos de aguas minerales sulfuradas. Corralillo Yagüajay

No	Edad (Símbolo)	Formación	Composición	Yacimiento
1	Neógeno (N ₁)	Manga Larga	Calizas rellenas e intercaladas de margas	
2	Cretácico superior (K ₂)	Amaro	Calizas, calizas silificadas, calizas dolomitizadas, silicatos, conglomerados con pedernal	
3	Cretácico inferior (K ₁)	Veloz	Calizas con intercalaciones de pedernal, bitúmenes y asfaltita, intercalaciones de esquistos arcillosos, calizas argilíticas, calizas tuffíticas	Menéndez Elguea

Yacimiento Menéndez

Se encuentra ubicado al ENE del poblado Martí, en las coordenadas X: 359 000, Y: 520 000. Las aguas de este yacimiento poseen la mayor mineralización reportada en el país, del orden de 59 a 71 g/l y un caudal de 8 l/s (Alvarez-Nodarse y Moreno, 1996).

El origen de las aguas minero - medicinales de Menéndez es similar al de Elguea. Según Bróderman (1947), las mismas se forman por infiltración profunda de carácter filoneano de las aguas meteóricas, las que al hacer contacto con un yacimiento yesífero salitrófero a una profundidad de alrededor de 1200 m, adquieren una mineralización superior a la del agua de mar, con altos contenidos de Cl⁻, SO₄²⁻, Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ y microcomponentes propios de las aguas marinas, tales como Br y I, B, etc., así como elevadas temperatura debido al gradiente geotérmico. Su ascenso a la superficie se produce a través de fallas locales. Estos criterios se justifican por la presencia de domos yesíferos cerrados en la Loma de Cunagua y costa norte de Matanzas, casi en el límite con Villa Clara y de tipo abierto en Punta Alegre (Ciego de Avila) y Turiguanó (Camagüey). Por otro lado, un pozo perforado en Cayo Coco, en la propia región, rindió aguas de composición similar a la de Elguea a 1157 m de profundidad (Bróderman, 1947).

En la tabla 4 se ilustran las principales propiedades hidroquímicas de las aguas de este yacimiento según los datos de Viciado et al (1983) y Marsal et al (1987). Las mismas clasifican como minerales, hipertermales, sulfuradas cloruradas sódicas, bromo – yoduradas, boratadas, con reacción neutra (Tab. 5). Poseen un patrón hidrogeoquímico del tipo 811-811 (Tab. 6; Fig. 1).

Yacimiento Elguea

Se encuentra ubicado en el municipio de Corralillo, a 12.5 km del poblado del mismo nombre. Coordenadas de su centro: X: 356 500, Y: 539 500. En este sitio fueron realizados estudios de exploración detallada por Viciado et al (1983) y Marsal et al (1987; 1995).

En el área del yacimiento se desarrolla en el complejos de rocas de edades Jurásico superior - Cretácico inferior (Fm. Veloz), Cratácico superior (Fm. Amaro), Mioceno inferior (Fm. Manga Larga) y medio y Cuaternario (Tab. 3c).

Los depósitos de la Fm. Veloz ocupan la parte norte del yacimiento. Están compuestos de calizas con intercalaciones de pedernal, con grietas finas rellenas de bitúmenes y asfaltita. Además existen otras litologías intercaladas tales como: esquistos arcillosos, calizas argilíticas, calizas tufíticas y pizarras. El límite superior de esta formación está dispuesto en forma discordante con los depósitos de la Fm. Amaro.

Las rocas de la Fm Amaro se localizan en la parte sur del yacimiento. Están constituidas principalmente por calizas, calizas silificadas, calizas dolomitizadas, silicatos y conglomerados con abundante pedernal.

Los sedimentos de la Fm. Manga Larga se desarrollan en toda el área del yacimiento. Yacen discordantes sobre la rocas de la Fm. Amaro y de la Fm. Veloz. Están compuestos por calizas rellenas e intercaladas de calizas margosas.

Los sedimentos del Cuaternario están formados por serpentinitas, arcillas caolinitizadas, limos y arenas. En la matriz aparece óxido de hierro.

Las aguas de este sitio han sido explotadas desde tiempos remotos. Se han encontrado en el lugar objetos de la cultura taina, lo que confirma el asentamiento de estos antiguos pobladores. A principios de la Revolución se construyó allí una instalación turística con fines balneológicos y recientemente se ha construido un nuevo centro con instalaciones hoteleras y balneológicas modernas.

En este lugar existen numerosos manantiales con caudales del orden de 23 l/s, antiguamente denominados: San Juan Bosco, San Antonio, San Lázaro, El Hierro y Carabaña. Hoy se nombran: El Guapo, El Suave, Garganta Hongos, Champú, Carabaña. El origen y composición de estas aguas es similar al de las aguas de Menéndez, tal como se aprecia en la tabla 4. Las mismas clasifican como minerales, hipertermales, cloruradas sódicas, sulfuradas, bromuradas, boratadas, con reacción alcalina (Tab. 5) y poseen un patrón hidrogeoquímico del tipo 811-811 (Tab. 6; Fig. 1).

Llanura de Manacas – Cienfuegos

Esta región natural se extiende 3850 km² a lo largo y ancho de los municipios de Santo Domingo, Cifuentes y Ranchuelo de la provincia de Villa Clara, y Rodas, Cruces, Lajas, Palmira y Cienfuegos de la provincia cienfueguera. Se corresponde aproximadamente con la región hidrogeológica Cienfuegos – Sancti Spíritus (Tab. 2).

En el área de esta región existen numerosos yacimientos de aguas minerales: Amaro (Santo Domingo), Lobatón (Cifuentes) y Ciego Montero (Palmira). En los dos primeros las aguas son de poca mineralización y se utilizan como aguas de mesa. En Ciego Montero, además de existir aguas minerales de este tipo, las cuales son embotelladas y destinadas al consumo de la población y de los turistas, existen aguas mineromedicinales con ausencia o relativamente bajo contenido de H₂S.

Yacimiento Ciego Montero

La constitución geológica de esta región se compone de rocas volcánicas y sedimentarias del Cretácico. Las rocas volcánicas están representadas por diabasas, andesitas, tobas de composición andesítica y aglomerados de lavas (Grupo Perseverancia, integrado por las formaciones Guanaja, Esperanza y otras, del Cretácico superior). Están presentes además depósitos de la Fm. Matagua del

Cretácico inferior, constituidos por areniscas tobáceas, aleurolitas y en ocasiones, calizas arrecifales, mientras que las rocas sedimentarias (con un desarrollo más limitado en esta zona), están constituidas de aleurolitas, areniscas, calizas compactas y capas de arrecifes y conglomerados (Ergerov y Luge, 1967). También afloran en el área intrusiones de granitoides representados superficialmente por dioritas muy erosionadas (Tab. 3d).

Tabla 3d. Formaciones geológicas y litología de las regiones relacionadas con los yacimientos de aguas minerales sulfuradas. Llanura de Manacas – Cienfuegos

No	Edad (Símbolo)	Formación	Composición	Yacimiento
2	Cretácico superior (K ₂₋₃)	Gp. Perseverancia (Fms. Guanaja, Esperanza, etc.)	Diabasa, aglomerados de lavas, areniscas tobáceas, aleurolitas, calizas arrecifales en ocasiones	Ciego Montero
3	Cretácico inferior (K _{1-2al})	Matagua	Aleurolitas, areniscas, calizas compactas, capas de aleurolitas y conglomerados	
4	Mesozoico	Intrusiones granitoides	Dioritas muy erosionadas	

Las aguas minerales emergen en el contacto de las rocas efusivas cretácicas con sedimentos de edad similar, aprovechando la presencia de numerosas fracturas tectónicas. En este sitio se encuentra ubicado el balneario (sanatorio) Ciego Montero (Coordenadas X: 556 500, Y: 282 500), donde desde hace más de un siglo se aplican dichas aguas con fines terapéuticos. Entre las fuentes más conocidas se encuentran las antiguamente denominadas La Purísima Concepción o del Chorro, El Frío, de la Caridad, San José, El Salado y manantial del Puente (Trelles, 1948), algunos de cuyos nombres aún se conservan. En años más recientes, se han llevado a cabo trabajos de prospección detallados en este yacimiento (Rodríguez et al, 1998), tanto para la búsqueda de aguas minerales con fines terapéuticos como para el consumo como aguas de bebida envasada.

En la tabla 4 se muestran las principales propiedades físicas y químicas de algunas fuentes representativas de este yacimiento. Las mismas clasifican como minerales mesotermiales, cloruradas sódicas con reacción alcalina. Algunas de ellas son además ligeramente sulfuradas (Tab. 5). El patrón hidrogeoquímico de las aguas mineromedicinales es el mismo que el de las aguas de Menéndez y Elguea (811-811), aunque existen otras aguas utilizadas como aguas minerales de mesa, cuyo patrón hidrogeoquímico es 532-271, correspondiente a un agua bicarbonatada mixta (Tab. 6; Fig. 1).

6. Región Alturas de la Cordillera Septentrional

Es un territorio estrecho y alargado que limita al norte con la Llanura de Corralillo – Yagüajay, en la parte meridional con la llanura Manacas Cienfuegos (porción occidental) y la Llanura de Santa Clara – Sancti Spíritus (sector oriental); al oeste limita con un pequeño sector de la Llanura Arabo a Real Campiña. Comprende parte de los municipios de Quemado de Güines y Placetas (Villa Clara), Yagüajay (Sancti Spíritus) y las partes occidentales de los municipios avileños de Florencia y Ciego de Avila (Tab. 2). Desde el punto de vista de la regionalización hidrogeológica, este territorio forma parte de la región hidrogeológica de la parte norte de la provincia de Las Villas (Gutiérrez y Glean, 1999). La constitución geológica está representada por calizas, esquistos, diabasas, andesitas, mármoles y otras rocas con edades que van desde el Jurásico superior hasta el Paleógeno (Tab. 3e). La región está surcada por fallas profundas de sobrecorrimientos, paralelas al eje de Cuba y cruzadas por otras fallas de desplazamiento lateral.

La región está formada por llanuras cársicas alternadas con alturas y colinas denudativo – cársicas, constituidas por rocas carbonatas y carbonatado – terrígenas. En el territorio se destacan la lomas de Santa Fe, Meneses, Jatibonico, Mabuya y otras. Las alturas de esta cordillera se presentan en forma de bloques escalonados, con elevaciones que varían entre 209 m (Loma de Santa Fe) hasta 443 m (Loma de Jatibonico).

Tabla 3e. Formaciones geológicas y litología de las regiones relacionadas con los yacimientos de aguas minerales sulfuradas. Cordillera Septentrional

No	Edad (Símbolo)	Formación	Composición	Yacimiento
1	Paleógeno (P ₁ -P ₁ ²)	Vega	Brechas carbonatadas, calizas, conglomerados de brechas, areniscas, tufitas, aleurolitas, margas	
2	Cretácio superior (K ₂₋₃)	Mata	Alternancia de calizas, pedernal, intercalaciones de conglomerados calcáreos y arcillosos	
3	Cretácico inferior (K _{1-2al})	Palenque	Calizas, calizas dolomitizadas y dolomitas	
4	Cretácico inferior (K _{1-2t})	Toba	Tobas	San José de los Lagos

Yacimiento San José de los Lagos

El yacimiento de las aguas minero medicinales San José de los Lagos se localiza al sur del pueblo de Mayajigüa, las coordenadas de su centro son X: 284, Y: 328 200. ,

En la región se presentan 4 formaciones geológicas: la Fm. Vega, de edad Paleógeno y las formaciones Palenque, Toba y Mata del Cretácico.

La Fm. Palenque se localiza al sureste del yacimiento, en las elevaciones de la Canoa. Esta constituida por diferentes tipos de calizas, calizas dolomitizadas y dolomitas. Esta formación está relacionada con la zona de alimentación del acuífero y los carbonatos se encuentran intensamente carsificados. El límite inferior no fue observado durante los trabajos de prospección geológica (Rodríguez et al, 1989; 1990), mientras que el límite superior lo constituye la Fm .Vega.

La Fm. Toba se extiende por la parte noreste del área y está compuesta de tobas litoclásticas. Esta formación sirve como frontera impermeable que impide la circulación de las aguas minerales del yacimiento hacia el mar.

La Fm. Vega está constituida por rocas terrígenas donde se encuentran presentes brechas carbonatadas, calizas, conglomerados brechosos, areniscas, tufitas, aleurolitas, y margas. Estos tipos litológicos forman paquetes independientes dentro del corte y se alternan entre ellas. En el interior de esta formación se localiza el yacimiento de aguas minerales, asociado a una zona de intenso agrietamiento producido por una red de fallas que se cruzan entre sí. Las rocas de esta formación también se encuentran afectadas por la carsificación.

La Fm. Mata aflora en la parte sureste de la región. Está constituida por calizas que se alternan con pedernales, conglomerados calcáreos y arcillas.

El yacimiento posee varios manantiales que brotan, precisamente al pie de la Loma de Canoa (Fagundo et al, 1991) y su zona de alimentación la constituyen las alturas de la Cordillera Septentrional. En este sitio existe un centro de recreación y tratamiento balneológico. Sus aguas, con mineralización menor de 1 g/l con ligero contenido de H₂S y temperaturas entre 30 y 35 °C, poseen un número variado de oligoelementos beneficiosos a la salud. De acuerdo a los estudios realizados por Rodríguez et al (1989; 1990), el contenido de H₂S en los manantiales varía entre 0.9 y 1.6 mg/l. El caudal de las mismas es de alrededor de 8 l/s (Alvarez-Nodarse y Moreno, 1996).

También existen otras aguas de menor mineralización y ausencia de sulfuros, las cuales pueden ser utilizadas como aguas de bebida envasada.

En la tabla 4 se exponen las principales propiedades químico físicas de las aguas minero medicinales de este yacimiento. Las mismas clasifican como minerales, hipotermales, sulfuradas mixtas, con reacción neutra (Tab. 5). Los patrones hidrogeoquímicos que poseen estas aguas son: 352-172, 352-271 y 163-181 (Tab. 6; Fig. 1).

8. Región Montañas de la Sierra del Turquino

Esta región ocupa la parte sur occidental del Subdistrito Montaña de la Sierra Maestra Occidental de la Subprovincia Cuba Orienta (Tab. 2). Comprende aproximadamente 3 546 km², los cuales se extienden por los municipios santiagueros de Guamá y el Tercer Frente y el oeste de Santiago de Cuba. En esta región se encuentra el yacimiento de aguas minero – medicinales La Cuquita.

La región natural Montañas de la Sierra del Turquino se corresponde con la región hidrogeológica Sierra Maestra. Se caracteriza por la presencia de un relieve montañoso con una brusca disección. En este territorio existen tres grupos de altas elevaciones: el grupo más occidental es el macizo del Pico Turquino, cuya cima culminante, Pico Real posee una elevación de 1872 m snm.

Yacimiento La Cuquita

Se ubica a 15 km al oeste de Chivirico y a 7 km al este de Uvero. Las coordenadas de su centro son X: 532 000, Y: 145 200.

La composición geológica predominante la constituyen depósitos vulcanógenos y vulcanógeno – sedimentarios de edad Cretácico de la Fm. La Bruja (Tab. 3f), así como rocas sedimentarias más jóvenes del Paleógeno (formaciones Uvero y Guamá) y el Cuaternario (Reborido y Vidal, 1987).

Las rocas de la Fm. La Bruja (Cretácico medio) se desarrollan hacia el este del río Turquino. De acuerdo a su composición litológica se dividen en dos miembros con yacencia concordante. El miembro inferior está representado por rocas vulcanógenas fragmentarias de composición andesito basáltica, tobas, tobas aglomeráticas y brechas volcánicas en ocasiones. El miembro superior se compone de areniscas, gravelitas, tobas, así como aglomerados de fragmentos gruesos de composición andesito – basáltica.

Las rocas de la Fm. Uvero (Eoceno) están ampliamente distribuidas en la zona del Uvero y Granma y son las predominantes en el yacimiento. Están representadas por intercalaciones de areniscas, aleurolitas, areniscas tobáceas, calizas, calcarenitas, tobas aglomeráticas y mantos de composición andesito – basáltica.

La Fm. Granma (Eoceno), también de amplia distribución en la región, se localiza al norte del yacimiento y yace de manera concordante sobre los sedimentos de la Fm. Uvero. Están constituidos

por depósitos de composición andesito – basáltica con intercalaciones de rocas tobáceas sedimentarias.

El sistema Cuaternario está representado por la Fm. Jutía y se observa a lo largo del litoral, con limitada distribución en el yacimiento. Se compone de bloques, cantos rodados, grava, areniscas y arcilla.

Tabla 3f. Formaciones geológicas y litología de las regiones relacionadas con los yacimientos de aguas minerales sulfuradas. Montañas de la Sierra del Turquino

No	Edad (Símbolo)	Formación	Composición	Yacimiento
1	Cuaternario (Q)	Jutía	Cantos rodados, grava, arenisca, arcilla	
2	Paleógeno (P)	Granma	Depósitos andesito basálticos, intercalaciones de rocas tobáceas sedimentarias	
3	Paleógeno (P)	Uvero	Intercalaciones de areniscas, aleurolitas, areniscas tobáceas, calizas, calcarenitas, tobas y mantos andesito basálticos	
4	Cretácico (K)	La Bruja	Rocas de composición andesito basáltica, tobas, brechas volcánicas, areniscas, gravelitas, tobas	La Cuquita

Las aguas subterráneas no minerales son de tipo bicarbonatadas cloruradas cálcicas y poseen una mineralización entre 0.4 – 0.5 g/l. Las aguas minerales corresponden a los yacimientos de El Cedrón y la Cuquita, estas últimas de tipo cloruradas sódicas, con temperaturas de 38 °C, mineralización de hasta 10 – 12 g/l y presencia de H₂S, metano, Sr, I y Br.

En este sitio existen varias fuentes termales, las cuales han sido utilizadas históricamente por los pobladores de la zona para curar enfermedades de la piel y otras dolencias. En el marco del desarrollo del Plan Turquino se hicieron varias perforaciones (pozos CQ-3, CQ-4, CQ-9, CQ-11 y CQ-13) con un caudal total de 5.12 l/s en la zona de fallas, donde también existen 3 manantiales.

En la tabla 4 se presentan las principales características químico-físicas de las aguas del pozos CQ 3, las cuales clasifican como minerales, hipotermales, sulfuradas cloruradas mixtas, bromo-yoduradas, estróncicas, con reacción neutra (Tab. 5). El patrón hidrogeoquímico es 451-811 (Tab. 6; Fig. 1).

RESUMEN DE LOS RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN HIDROQUÍMICA Y CLASIFICACION POR GRUPOS BALNEOLÓGICOS

A manera de resumen, en la tabla 5 se muestra la clasificación de las aguas según los grupos balneológicos, la cual toma en cuenta, además de los componentes principales de las aguas, la presencia de otros elementos de reconocida acción farmacológica y terapéutica (CO₂, Rn, SiO₂, Fe, F, Br, I, Sr, Ba, B y otros). Sobre esta base, se encuentran 17 grupos con especificaciones diferentes.

En la tabla 6 se exponen los tipos de aguas atendiendo a los aniones y cationes principales presentes, así como su formulación por tipos hidroquímicos y patrones hidrogeoquímicos de los yacimientos de aguas minerales sulfuradas estudiadas en este trabajo.

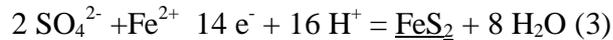
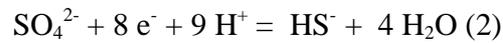
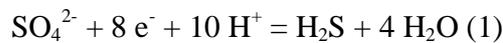
Como puede apreciarse en la referida tabla, existen 4 fuentes de aguas bicarbonatadas cálcicas, 4 bicarbonatadas sódicas, 16 bicarbonatadas mixtas, 9 sulfatadas cálcicas, 2 sulfatadas mixtas, 12

cloruradas sódicas y 2 cloruradas mixtas. Esta distribución es arbitraria, ya que depende de la naturaleza de las fuentes seleccionadas.

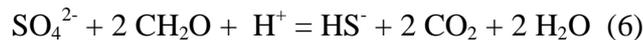
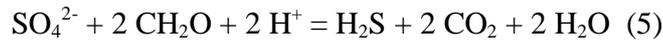
Con respecto a los patrones hidrogeoquímicos (Tab. 6; Fig. 1) estimados sobre la base de combinaciones numéricas entre 1 y 9 (Fagundo et al, 1996), se aprecian 20 patrones, lo cual apunta aproximadamente a una identidad hidrogeoquímica propia que distingue a cada yacimiento. Esta especificidad se hace más evidente si se consideran además las propiedades físicas (temperatura, pH, etc.), la mineralización y los microconstituyentes de las aguas.

PROCESOS GEOQUÍMICOS 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:

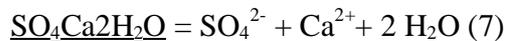


En presencia de materia orgánica (CH_2O), de la cual se nutren las bacterias, las dos primeras ecuaciones quedan como:



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 ferrooxidans*, 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:

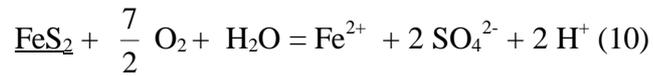
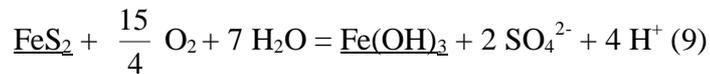


Yeso



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 el caso de las aguas minerales de Cuba, solamente las de los banerios de Menéndez y Elguea, se originan por disolución de yeso. Como se ha señalado anteriormente, dichas aguas están asociadas a yacimientos yesífero-salinos. El resto de las aguas minerales sulfuradas se originan por oxidación de piritas y reducción parcial de sulfatos.

RELACIONES ENTRE EL POTENCIAL DE OXIDACIÓN REDUCCION, EL PH Y EL CONTENIDO DE H₂S

Diagramas de estabilidad Eh vs pH

El contenido relativo de los compuestos que contienen azufre en forma oxidada o reducida (SO₄²⁻, H₂S, HS⁻, S²⁻) 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 sulfhídrido. A valores de pH inferiores a 7 predomina el H₂S, 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 (Mn²⁺-MnO₂, Fe²⁺-Fe₂O₃, H₂S-FeS₂, H₂S- SO₄²⁻, 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 (1-4), las cuales se exponen en la tabla 7.

Tabla 7. Equilibrios y Expresiones del diagrama Eh-pH

No	Sistemas de fases y Ecuación de equilibrio	Expresión termodinámica	Expresión Eh-pH
1	Sistema: H ₂ S - SO ₄ ²⁻ SO ₄ ²⁻ +8e ⁻ +10H ⁺ =H ₂ S+4H ₂ O	$\log K_{eq} = \log \frac{a_{H_2S}}{a_{SO_4}} + 8pe + 10pH$	pH < 7 Eh=0.29977-0.07375pH (25 °C) (1) Eh=0.29988-0.0750pH (30 °C) (2) Eh=0.29997-0.0775pH (40 °C) (3)
2	Sistema: HS ⁻ - SO ₄ ²⁻ SO ₄ ²⁻ +8e ⁻ +9H ⁺ =HS ⁻ +4H ₂ O	$\log K_{eq} = \log \frac{a_{HS}}{a_{SO_4}} + 8pe + 9pH$	pH > 7 Eh=0.2483-0.0664pH (25 °C) (4) Eh=0.2483-0.0675pH (30 °C) (5) Eh=0.2484-0.06975pH (40 °C) (6)
3	Sistema: H ₂ S- HS ⁻ H ₂ S= H ⁺ +HS ⁻	$\log K_{eq} = \log \frac{a_{HS}}{a_{H_2S}} - pH$	pH=7.0 (7) pH=6.9 (8) pH=6.7 (9)
4	Sistema: Fe ²⁺ - FS ₂	$\log K_{eq} = -4 \log a_{SO_4} + 30pe + 38pH$	a _{SO4} = 10 ⁻² , a _{Fe} = 10 ⁻⁶

	$4\text{Fe}_2\text{O}_3 + 4\text{SO}_4^{2-} + 38\text{H}^+ + 30\text{e}^- = 2\text{FS}_2 + 11\text{H}_2\text{O}$	$\text{Eh} = 0.3242 - 0.06743\text{pH}$ (25 °C) (10) $\text{Eh} = 0.3297 - 0.06857\text{pH}$ (30 °C) (11) $\text{Eh} = 0.3407 - 0.07086\text{pH}$ (40 °C) (12) $a_{\text{SO}_4} = 10^{-1.4}$; $a_{\text{Fe}} = 10^{-4.75}$ $\text{Eh} = 0.3331 - 0.07086\text{pH}$ (40 °C) (13)
5	Sistema: $\text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{FS}_2$ $2\text{SO}_4^{2-} + \text{Fe}^{2+} + 16\text{H}^+ + 14\text{e}^- = \text{FS}_2 + 8\text{H}_2\text{O}$	$\log K_{eq} = -2 \log a_{\text{SO}_4} - \log a_{\text{Fe}^{2+}} + 14pe + 16pH$ $a_{\text{SO}_4} = 10^{-2}$ $\text{Eh} = 0.3699 - 0.0747\text{pH}$ (25 °C) (14) $\text{Eh} = 0.3676 - 0.076\text{pH}$ (30 °C) (15) $\text{Eh} = 0.3693 - 0.0785\text{pH}$ (40 °C) (16) $a_{\text{SO}_4} = 10^{-1.4}$; $a_{\text{Fe}} = 10^{-4.75}$ $\text{Eh} = 0.3743 - 0.0785\text{pH}$ (40 °C) (17)

Consideraciones:

$$\frac{a_{\text{H}_2\text{S}}}{s_{\text{SO}_4}} = \frac{a_{\text{HS}^-}}{s_{\text{SO}_4}} = \frac{a_{\text{HS}^-}}{s_{\text{H}_2\text{S}}} = 1$$

$$\Sigma S = (a_{\text{SO}_4} + a_{\text{SHSO}_4} + a_{\text{SO}_4} + a_{\text{H}_2\text{S}} + a_{\text{HS}^-} + a_{\text{S}}) = 10^{-6}$$

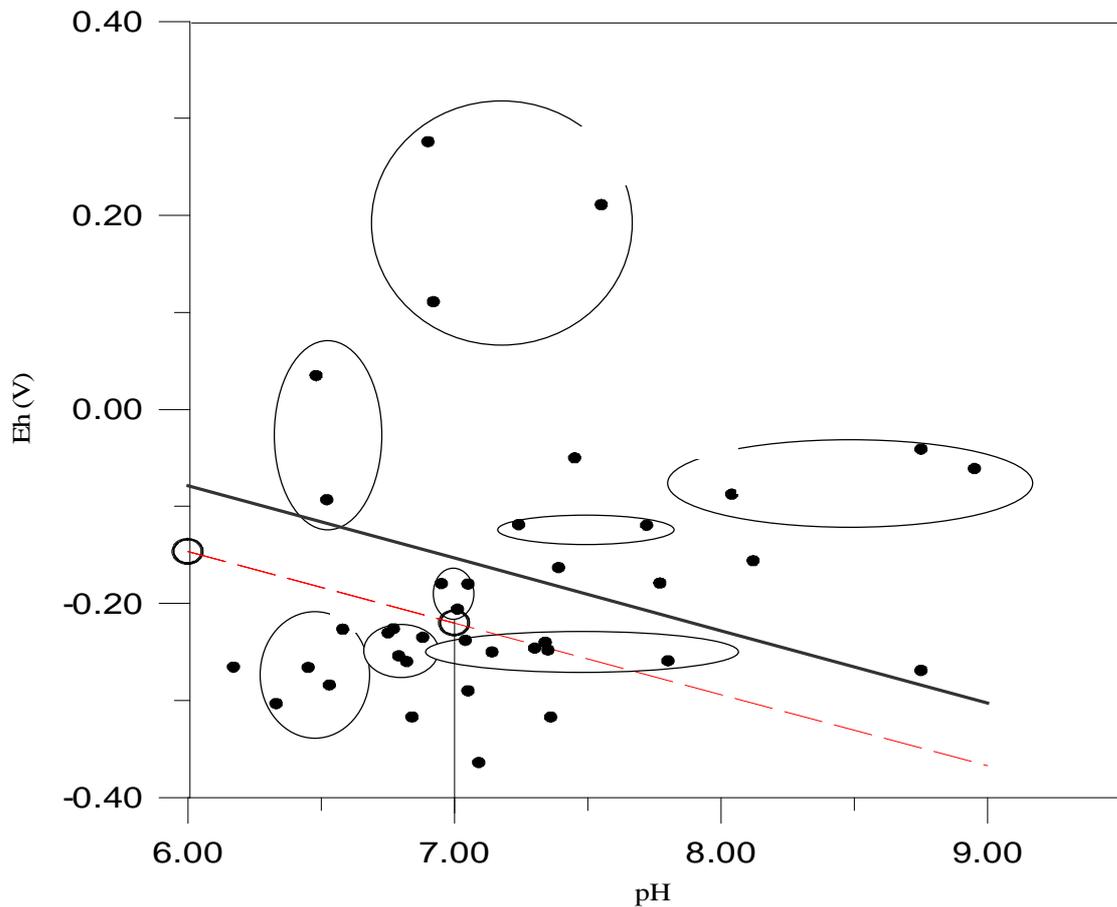


Figura 2. Relación entre el potencial redox y el pH

En la figura 2 se muestra la ubicación en el diagrama de Eh vs pH de los pares de datos correspondientes a mediciones de campo efectuadas por nuestro colectivo en algunos sitios representativos (González et al, 2000; 2001). 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 sulfurosos de Las Terrazas, Mil Cumbres, Rancho Lucas, Cayajabos y Cajalbana aparecen en la zona de estabilidad de los compuestos más oxidados (SO_4^{2-}), al igual que una gran parte de los manantiales de San José de los Lagos, Ciego Montero y algunos de Elguea (Belleza y Piscina). Estas aguas no poseen H_2S .
2. En la zona de estabilidad del FeS_2 se ubican parte de las muestras de San José de los Lagos con contenidos de H_2S relativamente bajos.
3. 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 sulfuroso y El Sitio.
4. En la zona de estabilidad del H_2S ($\text{pH} < 7$), se localizan las aguas minerales de San Diego de los Baños, Los Bermejales y el resto de las aguas de Elguea.

Relaciones matemáticas

Teniendo en cuenta que la relación entre los valores de Eh y pH permiten establecer cuando existen condiciones reductoras favorables para la formación de H_2S o HS^- , se puede inferir que la magnitud ΔEh , que expresa la diferencia entre el potencial redox medido en la fuente y el potencial redox correspondiente al estado de equilibrio de las fases en el diagrama Eh vs pH (con signo negativo): $\Delta\text{Eh} = -(\text{Eh}_{\text{real}} - \text{Eh}_{\text{teorico}})$, puede ser indicativa de la capacidad de generación de las especies sulfuradas de interés balneológico, y por tanto, existir entre dicha magnitud y el contenido de H_2S algún tipo de relación matemática.

En la tabla 8, se muestran los resultados de los cálculos del $\text{Eh}_{\text{teorico}}$ mediante las ecuaciones termodinámicas correspondientes a los equilibrios químicos (1-2) a las temperaturas de 25, 30 y 40 °C (Tab. 4), así como los valores de ΔEh correspondientes, el contenido de H_2S determinado en las aguas ($\text{H}_2\text{S} + \text{HS}^-$) y el logaritmo de dicho contenido. Relacionando estas magnitudes entre sí, se puede determinar que existe buena correlación entre ΔEh y el logaritmo de H_2S , tal como se muestra en la figura 3.

Es necesario separar los datos correspondientes a las aguas del balneario de Elguea del resto de las aguas minerales sulfuradas para obtener correlaciones significativas por separado. De hecho, aquellas aguas presentan temperaturas mayores (36-50 °C), así como una mineralización más elevada que las restantes.

A partir de las correspondientes ecuaciones de regresión se puede estimar tanto los valores de Eh como de log (H₂S). Las ecuaciones determinadas a partir de las líneas de regresión son las siguientes:

$$\log (\text{H}_2\text{S})_{\text{estimado}} = 0.0124 \Delta\text{Eh} + 0.5426 \quad (11) \quad (\text{toda la población de datos excepto los de Elguea})$$

$$\log (\text{H}_2\text{S})_{\text{estimado}} = 0.0076 \Delta\text{Eh} + 0.3834 \quad (12) \quad (\text{datos de Elguea})$$

$$\text{Eh}_{\text{estimado}} = \text{Eh}_{\text{teórico}} - 80.645 \log (\text{H}_2\text{S}) + 43.758 \quad (13)$$

(toda la población de datos excepto los de Elguea)

$$\text{Eh}_{\text{estimado}} = \text{Eh}_{\text{teórico}} - 131.578 \log (\text{H}_2\text{S}) + .44750 \quad (14) \quad (\text{datos de Elguea})$$

Como puede apreciarse en la tabla 8, existe buena correlación entre los datos reales y los estimados matemáticamente.

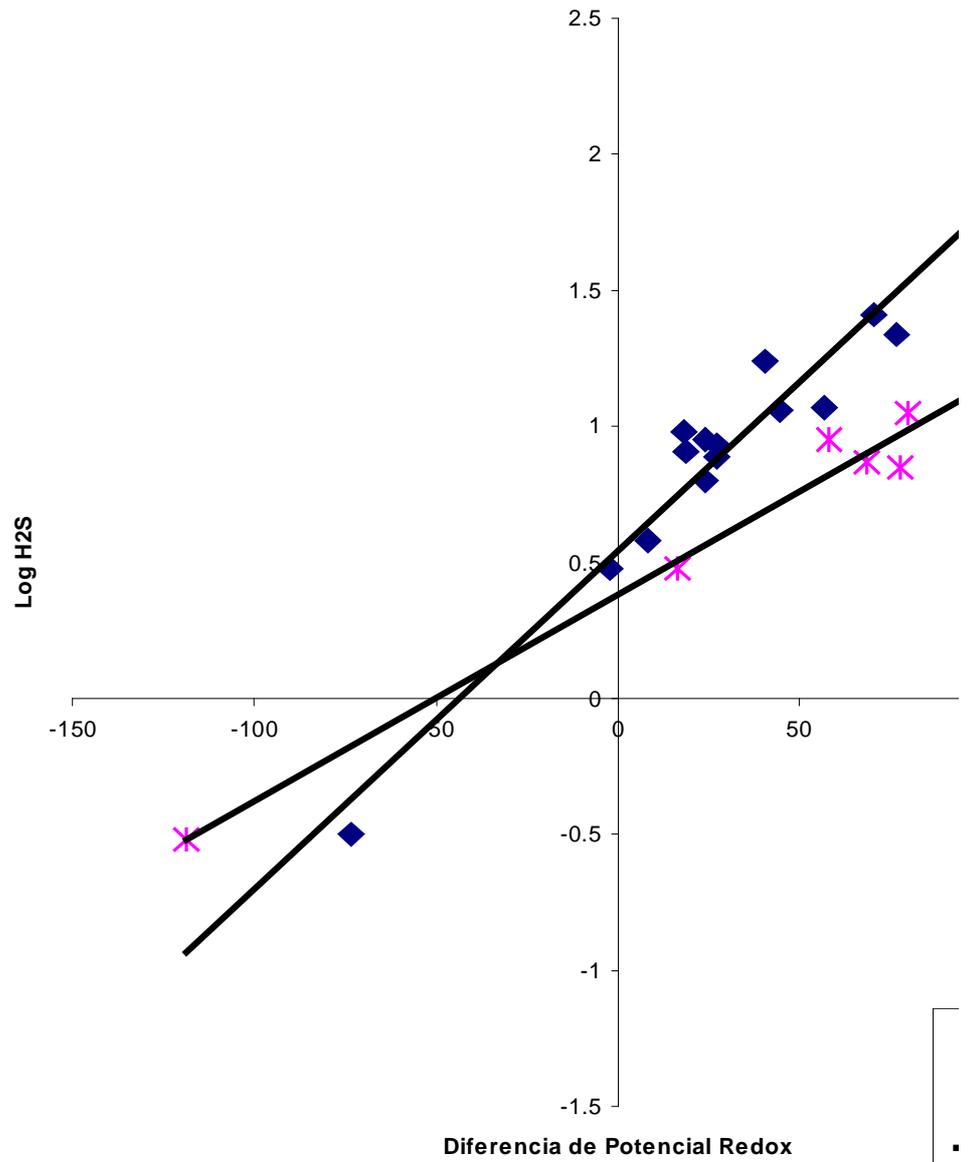


Figura 3. Correlación de la diferencia de potencial Redox con el logaritmo de la concentración de sulfúrico

Tabla 8. Comparación entre los valores de potenciales de oxidación reducción y contenidos de H₂S reales con los obtenidos por cálculo numérico

No	Eh Teórico	Eh real	ΔEh	Eh estimado	Log (H ₂ S) real	Log (H ₂ S) Estimado	H ₂ S real	H ₂ S Estimado
1	-242.4	-240	-2.4	-237.4	0.48	0.51	3	3.3
2	-239.7	-248	8.3	-242.7	0.58	0.65	1.6	4.4
3	-231.8	-259	27.2	-259.8	0.89	0.88	7.8	7.6
4	-225.8	-250	24.2	-246.6	0.80	0.84	6.3	7.0
5	-207.6	-235	27.4	-238.8	0.93	0.88	8.6	7.6
6	-203.2	-260	56.8	-245.7	1.07	1.25	11.7	17.7
7	-219.2	-238	18.8	-248.8	0.91	0.78	8.1	6.0
8	-206.4	-230.4	24.0	-239.3	0.95	0.84	9.0	6.9
9	-207.9	-226	18.1	-243.2	0.98	0.77	9.5	5.9
10	-209.4	-254	44.6	-251.1	1.06	1.10	11.5	12.5
11	-225.0	-265.5	40.5	-281.2	1.24	1.04	17.3	11.1
12	-213.1	-317	103.9	-304.0	1.67	1.83	46.8	67.8
13	-240.4	-317	76.6	-304.7	1.34	1.49	21.6	31.1
14	-219.8	-290	70.2	-289.8	1.41	1.41	26.0	25.9
15	-231.9	-364	132.1	-373.6	2.30	2.18	131.0	151.6
16	-347.3	-269	-73.3	-263.2	-0.5	-0.37	0.3	0.4
17	-204.8	-93	-118.8	-118.8	-0.52	-0.52	0.3	0.3
18	-210.3	-226.6	16.4	-223.0	0.48	0.51	3	3.2
19	-197.6	-266	68.5	-261.6	0.87	0.90	7.5	8.0
20	-206.4	-284	77.6	-267.8	0.85	0.97	7.0	9.4
21	-223.4	-303.2	79.8	-311.1	1.05	0.99	11.2	9.8
22	-187.8	-246	58.2	-262.4	0.95	0.83	9.0	6.7

1,2,3- Pozo Brocal (Las Terrazas); 4,5- San Juan Sulfuroso(Las Terrazas); 6- Aroyo Pedernales (Cayajabos); 7- M. Azufre (Cacarajícara); 8- Captación (El Tigre + El Templado, San Diego de los Baños); 9, 10- M. El Templado (San Diego de los Baños); 11- M. La Gallina (San Diego de los Baños); 12. M-1 (Bermejales); M. M. Sulfuroso (Mil Cumbres); 14- M. Cercano al balneario Soroa (Soroa); 15- Pozo P-55 (El Sitio); 16- Piscina Gimnasio (Ciego Montero); 17- M. Belleza (Elguea); 18- Piscina (Elguea); 19. M. Hongos (Elguea), 20. M. Garganta (Elguea); 21. M. El Guapo (Elguea), 22. M. Carabaña.

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 Vicente), P 1 (San Diego de los Baños), P 4 (Los Bermejales), PH 1 y PH 3 (Elguea), y PH 5 y PH 8 (Menéndez) a partir de los datos que aparecen en los informes de los

trabajos de prospección correspondientes (Peláez et al, 1990; Marsal et al, 1995). En la tabla 9 se muestran estos resultados.

Tabla 9. 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)
P1	San Vicente	0-100	50	2.5
		260-330	295	1
		350-400	375	1
P 1	San Diego de los Baños	0-122	61	9.0
		240-181	260	18.5
		237-320	278	40.0
P 4	Bermejales	103-206	155	23.9
		145-195	165	23.9
		206-300	253	61.5
PH 1	Elguea		0	15.5
			100	25.0
			160	82.0
PH 3	Elguea		0	11.0
			40	13.0
			100	6.0
			180	7.0
PH 5	Menéndez		0	27.5
			160	6.0
			180	8.0
PH 8	Menéndez		140	69.0
			280	26.0

Como puede apreciarse, en San Vicente las aguas minerales de tipo SO₄-Ca disminuyen su contenido de H₂S con la profundidad, desde 2.5 mg/l en la superficie hasta menos de 1 mg/l en el intervalo 260-330 m, media del intervalo 298 m). En San Diego de los Baños, por el contrario, las aguas del mismo tipo SO₄-Ca (Pozo P 1) incrementan su contenido de H₂S desde 9 mg/l, correspondiente al intervalo 0-122m (media del intervalo: 61 m) hasta 40 mg/l en el intervalo (237-320 m; media del intervalo: 278 m). Semejante tendencia presenta las aguas del pozo P 4, de tipo HCO₃ – Na, que incrementan su contenido de H₂S desde 23.9 mg/l en el intervalo 103 – 206 m (media del intervalo: 155 m) hasta 61.5 mg/l en el intervalo 206 – 300 m (media del intervalo: 253 m)

Las aguas del yacimiento Elguea de tipo Cl-Na, sin embargo, muestran un comportamiento ambiguo. Mientras en el Pozo PH 1 se experimenta un incremento del contenido de H₂S desde 15.5 mg/l en la superficie hasta 82.0 mg/l a 160 m de profundidad, en el pozo PH 3 la concentración de H₂S decrece desde 11 mg/l, en la superficie, hasta 7 mg/l a la profundidad de 180 m.

En las aguas del yacimiento Menéndez, también del tipo Cl-Na se produce un decremento de la concentración del H₂S en los dos pozos estudiados. En el pozo PH 5 la concentración disminuye desde 27.5 mg/l en la superficie hasta 8 mg/l a 180 m de profundidad, mientras que en el PH 8 se aprecia un descenso de 69 mg/l desde la profundidad de 140 m, hasta 26 mg/l a la profundidad de 180 m.

A partir de los resultados antes señalados no es posible llegar a conclusiones claras con respecto a la variación del contenido de H₂S con la profundidad. A manera de especulación, debe esperarse que en

dependencia de las conducciones óxido reductores, el tipo de mineral formador de sulfatos, el pH y la temperatura del medio, existirá una profundidad óptima par a 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.

Variación diurna 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, 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 10, 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 (4.61 %).

Tabla 10. 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

El efecto del ciclo diurno sobre la concentración de H₂S puede ilustrarse con más detalle en los ejemplos de los pozos PH 13, PH 16 y PH 12 (Tab. 11) del yacimiento San Miguel de los Baños (Rojas et al, 1995). Durante 6 días seguido se determinó en esos sitios el contenido de H₂S de manera sistemática entre las 8 de la mañana y las 5 de la tarde. En el pozo pH13 se encontró que la mayor generación de H₂S correspondía al período comprendido entre las 12:00 y 17:00 horas, mientras que en los pozos PH16 y PH12A no se observaron variaciones apreciables.

Variación estacional del contenido de H₂S

El efecto del ciclo hidrológico sobre el contenido de H₂S de las aguas minerales pueden 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 12 se muestra el comportamiento estacional de las aguas de los manantiales El Templado y La Gallina del yacimiento San Diego de los Baño y la del manantial M 1. del yacimiento 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. Estos resultados, junto a otros menos representativos debido a la naturaleza del muestreo se presentan en la tabla 12.

Tabla 11. Variación diurna del contenido de H₂S en el yacimiento San Miguel de los Baños

PH - 13			PH-16			PH - 12 A		
FECHA	HORA	H ₂ S (mg/l)	FECHA	HORA	H ₂ S (mg/l)	FECHA	HORA	H ₂ S (mg/l)
3-4-94	8:00	3.95	1-7-94	8:30	11.44	20-3-94	9:15	2.5
	9:30	3.95		9:00	11.44		10:15	2.5
	10:40	5.70		10:00	11.44		11:20	2.5
	12:00	7.09		11:00	11.88		12:25	2.5
	14:00	5.70		12:00	12.76		13:25	2.5
	15:00	7.09		14:00	12.32		14:25	2.5
	16:00	7.09					15:25	2.5
4-4-94	8:00	5.70	2-7-94	8:00	12.32	21-3-94	9:00	2.5
	9:00	7.09		10:30	12.32		10:00	2.5
	10:30	7.09		12:00	12.32		11:00	2.5
	12:00	10.56		14:00	12.32		13:00	2.5
	15:00	10.56		15:00	12.32		14:00	2.5
	17:00	10.56		17:00	12.32		15:00	2.5
5-4-94	8:00	7.09	3-7-94			22-3-94	8:45	2.5
	9:00	7.09		9:00	12.32		10:00	2.5
	10:00	10.56		10:00	12.32		11:00	2.5
	12:00	10.56		12:00	12.32		12:00	2.5
	14:00	10.56		14:00	12.32		13:00	2.5
	15:00	10.56		15:00	12.32		14:00	2.5
6-4-94	8:00	5.70	4-7-94	8:00	12.32	23-2-94	12:00	2.5
	9:30	7.09		9:00	12.32		13:00	2.5
	11:00	10.56		11:00	12.32		14:00	2.5
	14:00	10.56		13:00	12.32	24-3-94	10:00	2.5
	15:00	10.56		15:00	12.32		12:00	2.5
				17:00	12.32		13:00	2.5

Tabla 12. Variación del contenido de H₂S (mg/l) de algunas fuentes de aguas minerales sulfuradas de Cuba

Yacimiento	Fuente	Intervalo de medición	N	X ± S	C.V. (%)
San Vicente	P 1	08/06/91 - 27/06/91	9	2.61 ± 0.27	10.54
	P 3	19/6/91 - 30/06/91	5	7.31 ± 0.49	6.72
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
Bermejales	M 1	11/02/87 - 09/06/90	11	39.67 ± 2.25	5.66
	P 12	22/01/90 - 20/29/90	6	50.88 ± 1.12	2.21
Madruga	M. La Paila	23/09/88 - 23/10/88	10	12.99 ± 6.27	48.27
	P 12 La Paila	16/08/88 - 10/02/89	5	13.00 ± 9.81	75.39
	P 27 El Sulfuroso	10/12/88 - 10-03-89	6	6.27 ± 4.45	71.02
	P 27 A El Sulfuroso	23/09/88 - 19/12/89	15	2.93 ± 0.83	28.28
San Miguel de los Baños	PH 13	03/04/94 - 25/04/94	43	5.28 ± 3.63	68.36
	PH 16	30/06/94 - 10/07/94	45	12.86 ± 0.86	6.68
	PH 12 A	20/03/94 - 26/09/94	51	1.92 ± 0.60	31.44
Elguea	M. El Guapo	07/11/81 - 12/11/82	6	11.17 ± 4.59	40.61
	M. El Suave	07/11/81 - 12/11/82	6	9.67 ± 4.72	48.81
Menéndez	Mn 6	03/12/81 - 12/11/82	5	37.60 ± 19.62	52.17
	Mn 7	13/02/82 - 08/11/82	5	44.80 ± 14.04	31.35

Con el objetivo de ilustrar cómo influye el ciclo hidrológico en las condiciones óxido reductoras del medio acuático, se presentan a continuación los resultados obtenidos mediante mediciones de Eh detalladas, obtenidas mensualmente a lo largo del intervalo 1997-1998 en el sector hidrogeológico Güira – Quivicán de la Cuenca Sur de La Habana (Fagundo et al, 1999; González et al, 1999). En este sitio fueron seleccionados varios pozos ubicados a lo largo de la zona de alimentación, conducción y emisión de un acuífero cársico costero afectado por la intrusión marina.

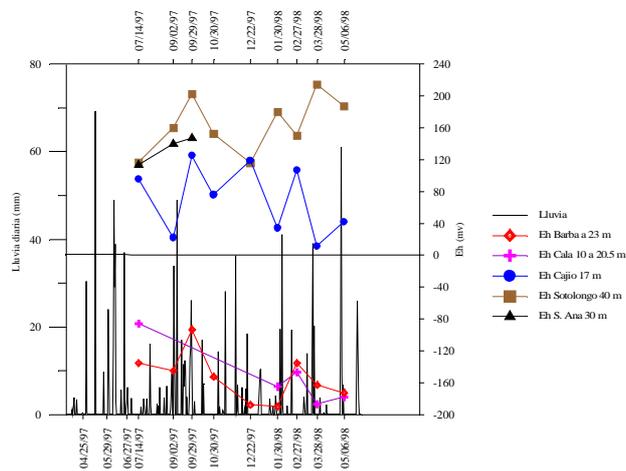


Figura 3. Variación temporal del potencial redox Eh (mV) en pozos muestreados en la zona de mezcla del sector Güira-Quivicán, Cuenca Sur de la Habana.

En la figura 3 se exponen los resultados correspondientes a la zona de mezcla agua dulce – agua de mar. En esta zona, la más activa de los acuíferos cársicos desde el punto de vista geoquímicos, el porcentaje de agua de mar en la mezcla varía entre 0.8 y 72%. En la misma, los sulfatos que acompañan el agua marina que invade el acuífero son reducidos en forma anaeróbica por las bacterias. En la figura 6 se representan además las lluvias caídas en el período estudiado sobre el área. Como puede apreciarse, en las aguas representativas tanto en la zona de alimentación (Sotolongo, Santa Ana) como de la zona de emisión del acuífero (Cajío), el valor de potencial redox es positivo, mientras que en las aguas de la zona intermedia, contigua a un humedal los potenciales de redox son negativos durante todo el año. Las oscilaciones dependen del régimen de lluvia, siendo mayor el valor del Eh en los períodos de grandes aguaceros y menores con posterioridad a un periodo de poca lluvia, lo cual está relacionado con el carácter oxidante del oxígeno disuelto que se infiltra en el acuífero durante las precipitaciones. El humedal en este caso, aporta la materia orgánica que es utilizada por la bacterias par reducir los sulfatos. La magnitud de los potenciales redox no alcanza en los valores necesarios para la producción de H₂S, pero sí son capaces de transformar el sulfato en sulfuro.

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 13 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 13. 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	1
X		27.30	27.26
S		0.50	1.54
C.V. (%)		1.83	5.64

CONCLUSIONES

- Los 24 yacimientos de aguas minerales sulfuradas estudiados se encuentran distribuidos en 8 regiones naturales, correspondientes a 9 regiones hidrogeológicas
- Los yacimientos de aguas minerales sulfuradas estudiados en Cuba, 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 mixtas (15), cloruradas sódicas (13) y sulfatadas cálcicas (9), existiendo además otros tipos hidroquímicos en menor proporción: bicarbonatadas cálcicas (4), bicarbonatadas sódicas (4), sulfatadas mixtas (2) y cloruradas 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 (CO_2 , Rn, SiO_2 , Fe, F, Br, I, Sr, Ba, B, etc.).
- Las aguas minerales sulfuradas de Cuba se originan por reducción de sulfatos procedentes de minerales yesíferos (yacimientos de Elguea y Menéndez) o piritas (el resto de los yacimientos). El contenido de relativo de sulfuros en forma de sulfuro o polisulfuro (S^{2-}), sulfhídrico (H_2S) 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 CO_2 , 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 H_2S . Existe buena correlación entre los datos de Eh y $\log(\text{H}_2\text{S})$ reales y los estimados mediante las ecuaciones termodinámicas deducidas a partir de los equilibrios químicos.
- No se encontró una relación clara entre la variación del contenido de H_2S y la profundidad a que fue tomada la muestra. Mientras en algunos pozos aquella se incrementaba a medida que aumentaba la profundidad, en otros se observó un decrecimiento. Al parecer existe una profundidad óptima en la cual se crean las condiciones más favorables (temperatura, pH, potencial redox, presencia de minerales formadores de sulfato, así como contenido de materia orgánica u otras fuentes de oxígeno asimilables por las bacterias) para la reducción anaeróbica de los sulfatos.
- Mientras en unos casos no se encuentran, variaciones temporales diurnas, diarias o estacionales del contenido de H_2S apreciables, ni tampoco variaciones significativas debidas a la explotación continua de los yacimientos, en otros casos, esas variaciones son considerables.

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 Palentología). Mapa Geológico de Cuba. Escala 1: 250 000, 1989.
- Alvarez-Nodarse, A. y A. M. Moreno, Las aguas minerales y mineromedicinales de Cuba. En contribucción 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.
- Broderman, J. Clasificación de las aguas minero-medicinales analizadas por el Instituto Nacional de Hidrología y Climatología Médicas. Archivos del Instituto Nacional de Hidrología y Climatología Médicas, Año II, No. 2, 1948.
- Canada Northwest Energy Limited. Groundruoter supply San Miguel de los Baños, Cuba, Komex. International L+D, Calgary, Van couner, Los Angeles, Rustal, 1995.
- 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. Informe sobre los manantiales de Ciego Montero. Archivos del Instituto de Hidrología, Climatología Médicas, Año I, No 4: 38-44, 1947.
- Embil, L., A. Calvache, J. Albear y F. Trelles. Excursión de la Dirección de Montes, Minar y aguas del Instituto Nacional de Hidrología y Climatología Médicas a Pozo del Azufre de Zequeira, en Arroyo de Mantua y los Bañitos de Los Portales de Guane. Archivos del Instituto de Hidrología, Climatología Médicas, Año II, No 1: 67-73, 1948.
- Embil , L .y F. Trelles. Estudio de los Baños de Sal y Cruz (Baños de Azufre) en San Cristobal, Pinara del Río, Archivos del Instituto de Hidrología, Climatologia Médicas, Año 1, No 2: 16-19, 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., M. Pulina y A.C. Rodríguez. Caracterización hidrogeologicas e hidrogeoquímica de las aguas de San José del Lago. Voluntad Hidraulica 1984: 2-6, 1991

Fagundo, R.R., J.E. Rodríguez, J.M. Pajón, E. Franco, G. Benítez, A.C. Rodríguez, J. Guerón e I. Abelló. Caracterización hidroquímica de las aguas del Pan de Guajaibón y otras áreas cársicas cercanas a la Sierra del Rosario. Libro de Comunicaciones I Taller sobre Cuencas Experimentales en el Karst, Matanzas 1992). Ed. Univ. Jaume I, Castellón (España): 43-53, 1993.

Fagundo, J.R., P. González, S. Jiménez, G. Benítez, V. Ferrera, A. González, E. Romero, D. Orihuela, J. Ramírez y M. Suárez. Metodología para la caracterización geoquímica de los acuíferos cársicos costeros. II. Identificación de los procesos de mezcla y modificación de las facies hidroquímicas. En: "Contribución a la Educación y la Protección Ambiental". Editorial Academia, ISCTN. Vol. 0, 182-191, 1999.

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-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.

Furet, N.R, A. Dago, A.C. Rodríguez, J.R. Fagundo, M. Llerena, B. Luna y C. Portilla. Estudio químico – estructural de rocas sedimentarias de tres zonas de Cuba mediante Difracción de Rayos X y Espectrometría de Absorción Atómica." En: Contribución a la Educación y la Protección Ambiental. Editores: F.M. Luzardo, O. Arjona, J.E. Estévez y J. L. Santana. Ed. Academia, La Habana, 120-123, 1998.

González, P., Fagundo, J.R., G. Benítez, S. Jiménez, V. Ferrera, A. González, E. Romero, D. Orihuela, J. Ramírez y M. Suárez. Metodología para la caracterización geoquímica de los acuíferos cársicos costeros. I. Muestreo sistemático y caracterización de facies hidroquímicas. En: "Contribución a la Educación y la Protección Ambiental". Editorial Academia, ISCTN. Vol. 0, 173-181, 1999.

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). Paris (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.
- KOMEX International LTD. Groundwater supply study, San Miguel de los Baños, Buba. Ed. Canada Northwest Energy Limitd., 1995.
- 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.
- Marsal, W., E. López y M. A. Alfonso. Informe exploración detallada. Aguas termominerales “Elguea”. Unión de Geología. Expedición Geológica Habana-Matanzas, 1987.
- Marsal, W., E. López y M. A. Alfonso. Informe Exploración Complementaria aguas termominerales “Elguea” Unión Geólogo Minera. Empresa Geólogo Minera del Centro Santa Clara, 1995.
- Moreno, A.M. Comportamiento de los parámetros físico-químicos de las aguas mineromedicinales del sector San Miguel (San Miguel de los Baños, Matanzas, Cuba). Tesis de Maestría en Ciencias del Agua. CNIC, 1999.
- 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
- Peláez. R., A. Reyes y R. Núñez, Informe de exploración orientativo de las aguas minero-medicinales y peloides de San Vicente, Viñales, Pinar del Río, Empresa Geólogo Minera de Pinar del Río, 1991.
- 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.
- Reborido, J., P., Vidal. Resultados preliminares de la investigación del yacimiento de aguas termominerales “la Cuquita”, Municipio Guamá, Provincia Santiago de Cuba. Empresa Geológica Santiago, 1987.
- Rodríguez, J.E., J.R. Fagundo, F. Cutié, C. Cruz y E. Franco. Hidrología cársica del macizo del Pan de Guajaibón, Sierra del Rosario, Pinar del Río, Cuba, durante el año hidrológico Noviembre de 1984-Octubre de 1985. Monografía. Ed. Academia, La Habana, 60 Pags. 1989.
- Rodríguez, M., V., Ruiz, A., Álvarez y R. Ching. Informe Búsqueda y exploración orientativa de aguas minero-medicinales de San José del Lago. Expedición Geológica Villa Clara, 1989.

Rodríguez, M., R. Ching, S. Borroto. Informe búsqueda y exploración agua mineromedicinales de San José del Lago (aguas mineromedicinales de mesa) MINBAS, Unión de Empresa Geologica, Expedición Geologica Villa Clara, 1990.

Rodríguez, M., S., Zayas, R. Ching, Ma. A. Ayoso. Informe sobre la exploración de las aguas medicinales de Ciego Montero. Empresa Geológica Villa Clara, 1989

Rojas, P., Informe del proyecto de la prospección preliminar y detallada de San Miguel de los Baños, Cuba, 1992.

Rojas, P., Arias del Toro, R. Stut, L. Pérez, R. Daria y otros. Informe del Proyecto de exploración orientativa y detallada de las aguas minero-medicinales y naturales "San Miguel de los Baños". Unión Geóloga Minera. Expedición Geológica Habana-Matanzas, 1995.

Romero, J., A.M. Moreno y E. Rocamora. Dictamen de la favorabilidad del uso de las aguas mineromedicinales del sector "San Miguel" con fines turísticos y balneológicos. CESIGMA: División América, 1998.

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.

Stout, R, J., Arias del Toro, L. Pérez y R. Rodríguez. Informe Prospección detallada y exploración orientativa aguas minero-medicinales Varadero-Cantel. Unión Geóloga. Expedición Geológica Habana-Matanzas, 1991.

Trelles, F. Análisis de algunas de las aguas minero-medicinales cubanas estudiadas por este Instituto. Archivos del Instituto de Hidrología, Climatología Médicas, Año 2, No 2, 171-184, 1948.

Vega, P.O, O. Gorobits, A. González, L. Pérez, J. Areas del Toro, R. Shout y R. Rodríguez. Informe de la prospección detallada y exploración de las aguas minero-medicinales en el yacimiento Santa María del Rosario, Municipio Cotorro, 1992.

Viciedo, E., A. Alonso, S. Ramírez y A. Perdomo. Informe Aguas Termominerales Elguea – Menéndez. Empresa de Geología de Santa Clara, 1983.