



M. Rodríguez y otros

PATRONES Y PROCESOS HIDROGEOQUÍMICOS DE LA SIERRA DEL ROSARIO Y SU RELACIÓN CON EL MEDIO AMBIENTE GEOLÓGICO

M. Rodríguez Piña¹, J. Reynerio Fagundo Castillo², P. González Hernández², J. R. Hernández Santana³, J. Carrillo Rivera³, I. Antigüedad Auzmendi⁴, Ana Abraham Alonso⁵, M. Suárez Muñoz², C. Melián Rodríguez².

1. Centro de Estudios del Medio Ambiente (mrp@rect.uh.cu), 2. Centro Nacional de Medicina Natural y Tradicional, 3. Instituto de Geografía de la UNAM (México), 4. Universidad del País Vasco (España), 5. Instituto de Geografía Tropical.

RESUMEN

El procesamiento mediante modelos geoquímicos de datos de composición química de aguas de diferente naturaleza hidrogeológica, tomados de manera sistemática en la Sierra del Rosario, Pinar del Río, permitió caracterizar el sistema de flujos que drena sedimentos de diferente litología en esa cordillera. Se demuestra que las propiedades químico-físicas de estas aguas dependen de los procesos de interacción agua - roca durante el tiempo de contacto que media desde la infiltración hasta su emergencia y de la constitución de los materiales acuíferos drenados, por lo que el medio ambiente geológico controla su composición química.

Los programas aplicados se basan en modelos químico - físicos: termodinámicos, cinéticos, de reconocimiento de patrones, balance de masa y mezcla de aguas. En el marco de la investigación se desarrollaron algoritmos complementarios para poder calcular algunos procesos complejos de interacción agua - roca.

Palabras clave: sistema de flujos subterráneos, patrones hidrogeoquímicos, modelación hidrogeoquímica.

ABSTRACT

Processing data, by means of geochemical models, of water chemical composition, corresponding to flows of different hydro geologic nature, sampled systematically at Sierra del Rosario, Pinar del Río, allowed to characterize the flow system which drains different sediments from that mountain. The results show that the physicochemical properties of these waters depend on the water - rock interaction processes during the time of contact from the infiltration of the precipitation to the emission of the waters, and on the constitution of the drained aquifer materials, therefore the geologic environment control its chemical composition.

The used software is based on physic- chemist models: thermodynamic, kinetic, pattern recognition, mass balance and mixing water models. Throughout the investigation new complementary algorithms were developed with the aim to calculate some complex water – rock interaction processes.

Keywords: groundwater flow systems, hydrogeochemical patterns, hydrogeochemical modelling.

INTRODUCCIÓN

La Sierra del Rosario se encuentra en Pinar del Río, al sudoeste de la provincia La Habana y ocupa una superficie de 1 125 km². El área ha experimentado poco cambio medioambiental, en virtud de la escasa población que la habita, la cual se ha confinado principalmente al pie de los macizos montañosos. La fauna y flora autóctona locales han sufrido menos impacto que en otras regiones y la calidad del agua



M. Rodríguez y otros

ha sufrido poco deterioro por la actividad humana, dependiendo fundamentalmente de las características geológicas del terreno.

Durante los últimos cuarenta años se han realizado varias importantes contribuciones que permiten adquirir mejor conocimiento acerca de las propiedades químico - físicas de las aguas de la Sierra del Rosario. Entre los trabajos referidos a este tema, que aparecen reportados, podemos citar las investigaciones realizadas por Fagundo y colaboradores desde 1984, sobre la denudación química del carso tropical y el control de la composición química del agua (Pulina y Fagundo, 1992; Rodríguez y Fagundo, 1995; Fagundo et al, 1986; 1997), sobre las aguas minerales (Fagundo et al, 2005; González et al, 2001), así como los estudios efectuados por Peláez et al (1990) relacionados con la prospección de aguas minerales y mineromedicinales. Estos trabajos han suministrado una abundante información que permite establecer el control geológico sobre los recursos de aguas subterráneas en la región. Los múltiples manantiales de diferente naturaleza hidrogeológica que ocurren en la región se deben a la naturaleza cársica del terreno y a la disposición de las secuencias estratigráficas presentes.

El objetivo de la investigación realizada fue dirigido a integrar los recursos hídricos de la Sierra del Rosario en los programas de desarrollo socio-económico de la región, partiendo de la base de que las características físico-químicas de los mismos posibilitan diferentes usos: terapéutico, embotellamiento, abastos, recreación. Para ello es necesario estudiar el comportamiento hidrogeológico del sistema de flujos y los procesos hidrogeoquímicos que originan la composición química de las aguas naturales y minerales de mayor interés, acorde a las peculiaridades geológicas de la región.

Geología e hidrogeología

La geología de la Sierra del Rosario se caracteriza por una complejidad litológica y estructural (Fig. 1), como consecuencia del desplazamiento y transporte tectónico de rocas ocurrido durante el Eoceno Medio (Pszczoikowski, 1978; Academia de Ciencias, 1988). En el área se aprecian tres unidades fosiográficas principales paralelas e intercaladas entre sí, constituidas por calizas, esquistos - areniscas y rocas ultrabásicas, las cuales están limitadas al norte y al sur por las fallas Bahía Honda y Pinar respectivamente. Estas características morfológicas hacen que las aguas almacenadas por las secuencias más permeables emergen en los contactos con las menos permeables, originando arroyos y ríos que vierten sus aguas al Golfo de México o hacia el Mar Caribe.

Las características generales de las unidades geológicas que afloran en el área se describen ligeramente a continuación desde las más antiguas hasta las más recientes:

La Fm. San Cayetano, del Jurásico inferior (J₁-J₃) es la unidad más antigua que aflora en la Sierra del Rosario. Se compone de areniscas cuarzosas, pizarras, lutitas, argilitas, esquistos filitizados y material carbonoso.

La Fm. Artemisa (J₃-K₁) es la más ampliamente distribuida en el área, pertenece al Jurásico superior - Cretácico inferior. Está representada por calizas estratificadas con intercalaciones de silicitas en la parte superior del corte.

La Fm. Sierra Azul (K₁-2) pertenece al Cretáceo inferior-superior y está representado por material terrígeno carbonatado, así como por calizas, calizas margosas, argilitas y silicitas.

La Fm. Guajaibón (K₁-2), constituida por calizas masivas, se originó en el Cretáceo.

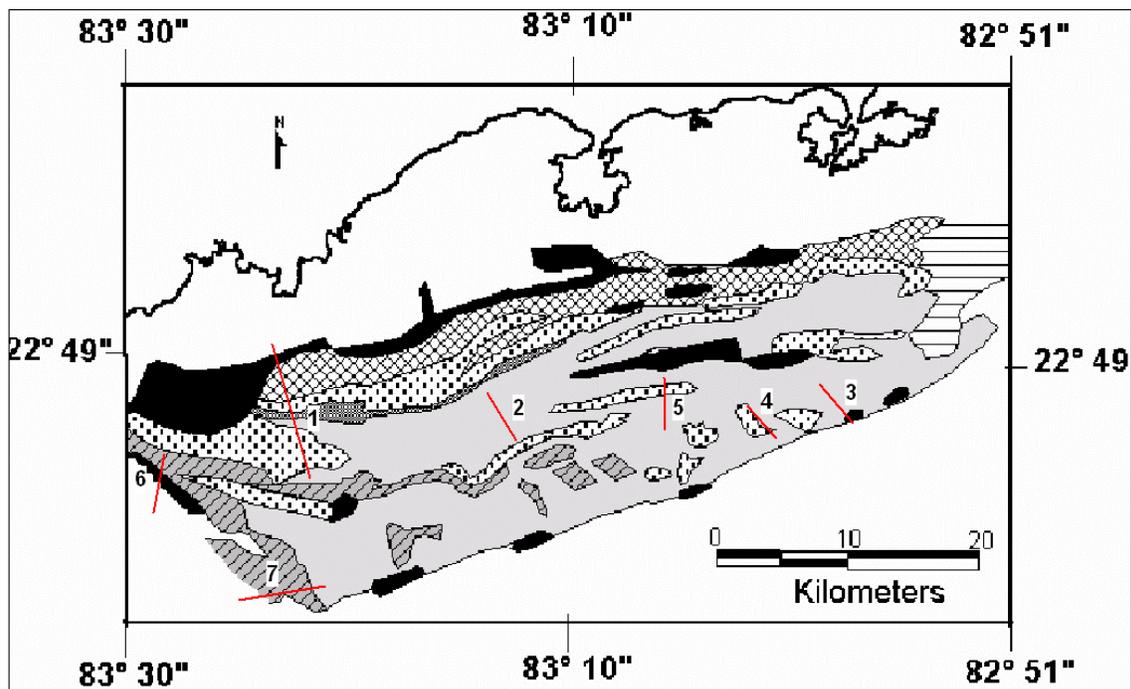
La Fm. Cacarajícara (K₂), es también del Cretáceo superior y se compone de brechas calcáreas, calcilutitas y en ocasiones de fragmentos de rocas volcánicas.

A la Fm. Manacas (P₁₋₂) se le ha asignado una edad indiferenciada Paléogeno – Eoceno.



M. Rodríguez y otros

En las figuras 2, 3 y 4 se muestran los patrones hidrogeoquímicos de 7 perfiles seleccionados de la Sierra del Rosario, donde aparecen las principales secuencias estratigráficas que afloran en el área y los principales sitios muestreados. En la figura 5 se expone la leyenda correspondiente a dichas figuras. Desde el punto de vista hidrogeológico, la Sierra del Rosario se caracteriza por la presencia de fajas de diferente constitución litológica, orientadas de norte a sur (Figura 1), las cuales están en contacto tectónico según superficies de sobrecorrimiento, adicionalmente deformadas en un conjunto de nappes, cruzadas por fallas transversales a las fallas principales (Pinar y Bahía Honda).



Leyenda

	Areniscas, esquistos y calizas de las Fms. Víbora y Capdevila		Calizas de la Fm. Artemisa
	Areniscas, esquistos y calizas de la Fm. Manacas		Areniscas, pizarras y esquistos de la Fm. San Cayetano.
	Rocas basálticas y silicoclásticas de las Fms. Encrucijada y Quiñones.		Serpentinitas de la Asociación Ofiolítica.
	Calizas de las Fms. Guajaibón, Sierra Azul, Lucas y Polier; brechas, calcarenitas y calcilitas de la Fm. Cacarajícara.		

Figura 1. Esquema geológico con secciones seleccionadas para el estudio de la relación existente entre los patrones hidrogeoquímicos y la disposición de las secuencias estratigráficas de la Sierra del Rosario

MATERIALES Y MÉTODOS



M. Rodríguez y otros

Para el desarrollo de este trabajo se utilizaron 376 datos hidroquímicos, a partir de muestreos realizados entre los años 1984 y 2002 (Franco et al, 1987; Peláez et al, 1990; Fagundo et al, 1995; González et al, 2000). Las correspondientes mediciones de los parámetros físicos y químicos se realizaron en el campo, las más recientes mediante pHmetro, medidor de temperatura y potencial redox (Eh), modelo HI-8424, marca HANNA y oxímetro modelo HI-914, marca HANNA. Los contenidos de CO₂ y H₂S, así como la alcalinidad total (HCO₃⁻ y CO₃²⁻) fueron también determinados “in situ”, mientras que los restantes macro constituyentes (Cl⁻, SO₄²⁻, Ca²⁺ y Mg²⁺) y componentes trazas se analizaron en el laboratorio antes de las 24 horas de tomadas las muestras, utilizando métodos volumétrico siguiendo las recomendaciones del Standard Methods for the Examination of Wastewater (APHA; AWWA; WPCF; 1989).



M. Rodríguez y otros

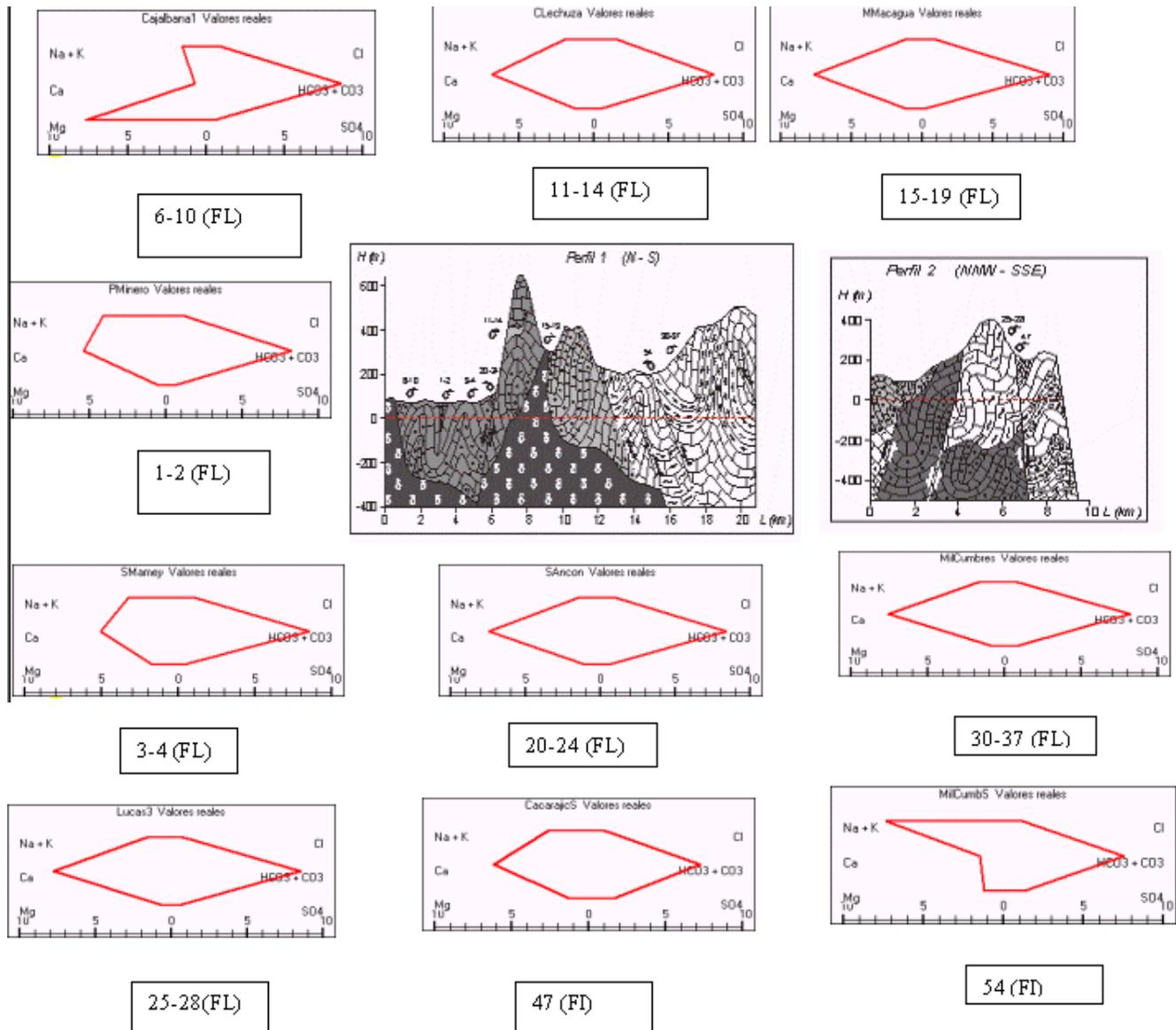


Figura 2. Patrones hidrogeoquímicos correspondientes a las muestras tomadas en los perfiles 1 (Sierra de Cajalbana-Mil Cumbres) y 2 (Sierra Azul-Rancho Lucas). En el perfil 1 emergen flujos locales e intermedios que interceptan rocas ultrabásicas de la Asociación Ofiolítica (6-10), esquistos, areniscas y calizas de la Fm. Manacas (1-4), calizas de la Fm. Guajaibón (11-24), calizas de la Fm. Artemisa (30-37); así como un manantial de un flujo intermedio que drena calizas de la Fm. Artemisa e interactúa con esquistos y areniscas de la Fm. San Cayetano. En el perfil 2 emergen flujos locales e intermedios que interceptan: calizas de las formaciones Sierra Azul y Lucas (25-28), breccas, calcarenitas y calcilitas de la Fm. Cacarajicara (47).



M. Rodríguez y otros

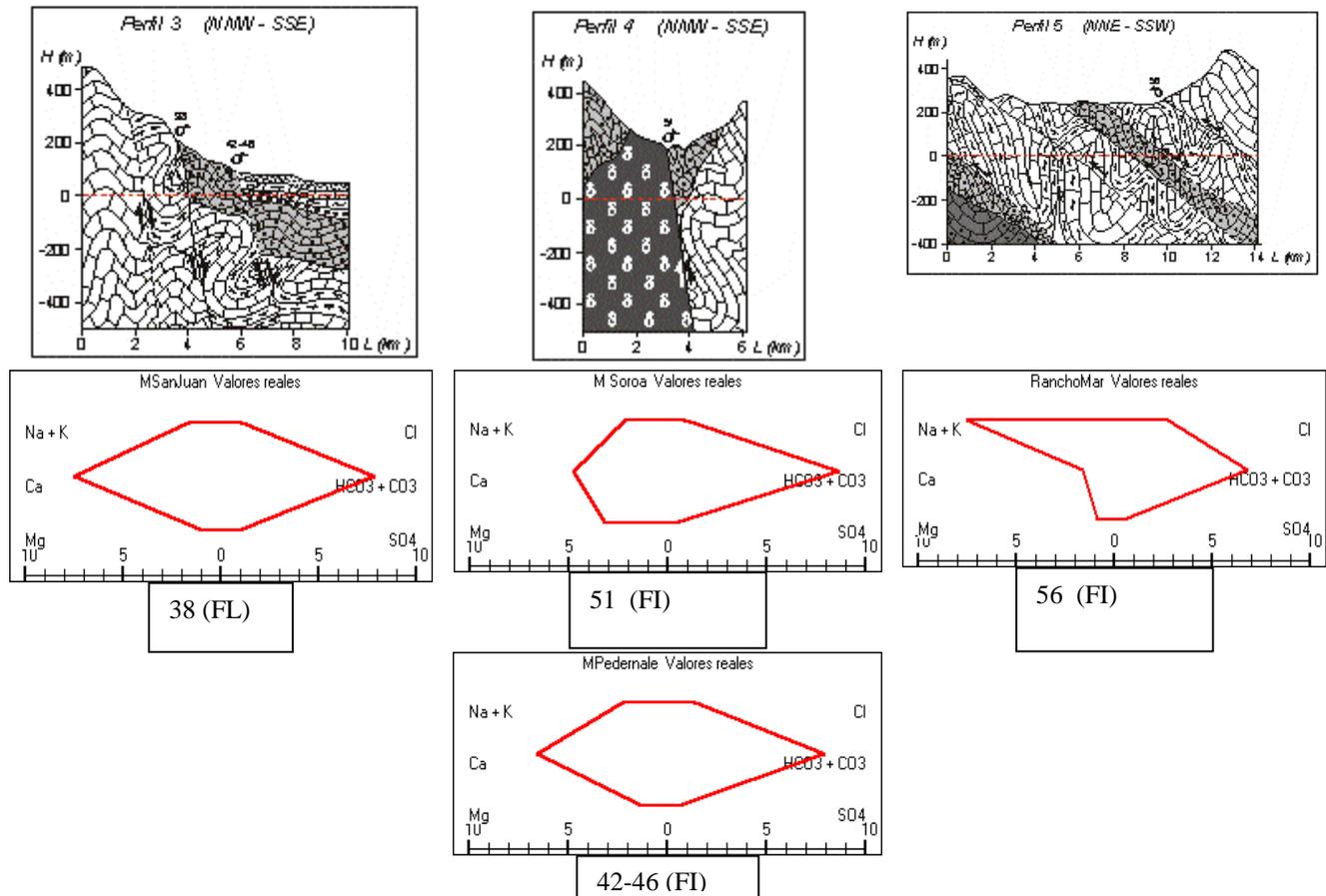


Figura 3. Patrones hidrogeoquímicos correspondientes a las muestras tomadas en los perfiles 3 (Las Terrazas-Falla Pinar), 4 (Soróa-Falla Pinar) y 5 (Rancho Mar), las cuales interceptan calizas de la Fm. Artemisa y otras litologías. Emergen flujos locales (38) e intermedios (42-46, 51, 56). Algunos de estos últimos interactúan con rocas ultrabásicas (51) o con esquistos y areniscas (56).



M. Rodríguez y otros

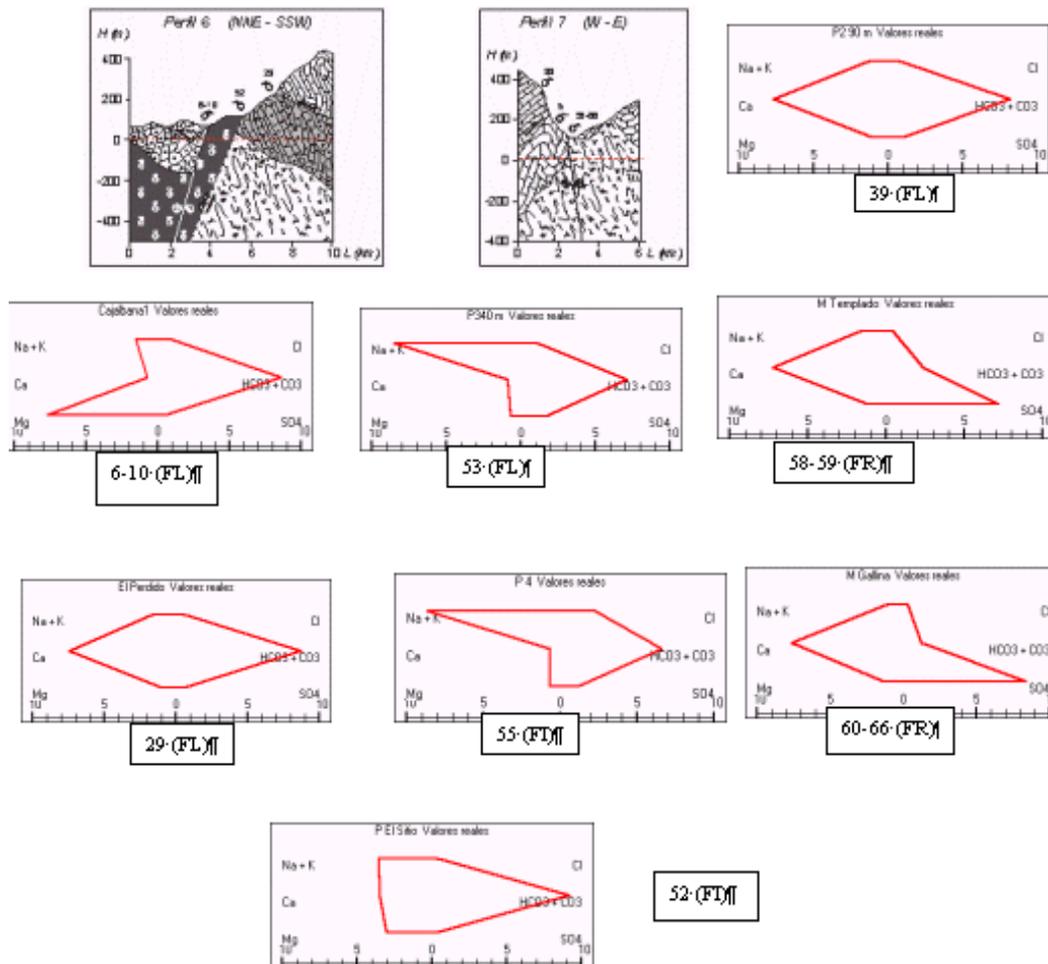


Figura 4. Patrones hidrogeoquímicos correspondientes a las muestras tomadas en los perfiles 6 (Sierra de Cajalbana-Caimito) y 7 (Los Bermejales-San Diego de los Baños). En el perfil 6 emergen flujos locales que interceptan: rocas ultrabásicas de la Asociación Ofiolítica (6-10), calizas de la Fm. Artemisa (29); así como un manantial de un flujo intermedio que drena calizas de la Fm. Artemisa e interactúa con esquistos y areniscas de la Fm. San Cayetano y con rocas ultrabásicas (52). En la composición de esta última muestra se refleja la acción de la mezcla de litologías. En el perfil 7 emergen flujos locales que interceptan: calizas de la Fm. Artemisa (39), flujos locales (53) e intermedios (55) que drenan esquistos y areniscas de la Fm. San Cayetano; así como flujos regionales y de un recorrido más profundo que drenan calizas de la Fm. Artemisa e interactúan con otras litologías (60-66).



M. Rodríguez y otros

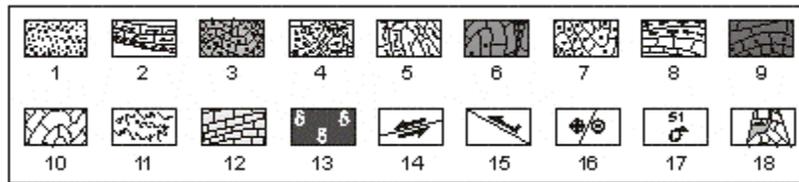


Figura 5. Leyenda de las secciones 1-7 de la Sierras del Rosario:

1. Arenas, gravas, cantos rodados y arcillas cuaternarias (Q); 2. margas, conglomerados y areniscas del Mioceno inferior y medio (N_1^{1-2}); 3. Areniscas y calizas del Paleoceno - Eoceno (P_{1-2}); 4. Brechas calcáreas, calizas y argilitas del Cretácico superior (K_2); 5. Margas y calizas del Cretácico superior (Maestrichtiano) (K_2 m); 6. Areniscas y calizas del Cretácico superior (Cenomaniano - Turoniano) (K_2 cm-t); 7. Areniscas del Cretácico inferior - superior (Albiano - Cenomaniano) ($K_{1.2}$ al - cm); 8. Calizas y argilitas del Cretácico inferior (Aptiano - Albiano) (K_1 a-al); 9. Calizas y areniscas del Cretácico inferior - Barremiano (K_1 b-bm); 10. Calizas del Jurásico superior - Cretácico inferior (J_3 - K_1); 11. Esquistos, cuarcitas y areniscas del Jurásico inferior - superior (Oxfordiano) (J_1 - J_3 ox); 12. Serpentinitas, piroxenitas, peridotitas y dunitas serpentinizadas del complejo ofiolítico septentrional; 13. Fallas neotectónicas de desplazamiento vertical; 14. Fallas de sobrecorrimiento, orogénicas, pre - eocénicas; 15. Falla de desplazamiento horizontal; 16. Flujos locales e intermedios; 17. Sistemas cavernarios.

Los datos de composición química se representan mediante patrones hidrogeoquímicos (Fagundo, 1998). Los mismos están formulados a partir del tanto por diez de la concentración aniónica y catiónica expresada en meq/l. Se calculan y representan mediante el programa de computación MODELAGUA (Fagundo-Sierra et al, 2001). Usando este código se determinaron también los procesos geoquímicos que explican el origen de la composición química de las aguas mediante modelos de balance de masa y mezcla de aguas. Se diseñó además un algoritmo complementario para determinar los procesos geoquímicos que se producen en los casos en que los flujos interactúan con dos o más litologías portadoras del mismo catión (Mg^{2+} originado por disolución de dolomita o intemperismo de serpentinita, Ca^{2+} originado por disolución de calcita y anorthita). Mediante este algoritmo se determinó la composición de las plagioclasas en términos de albita y anorthita.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Identificación del sistema de flujos

En la tabla 1 se presenta el inventario de puntos de agua muestreados en el área de estudio. Los datos aparecen agrupados por formación geológica, o sea, por tipo de roca drenada por las aguas de lluvia. La información que aparece de forma resumida en la tabla, se describe a continuación:

Grupo 1: Serpentinitas de la Asociación Ofiolítica del Mesozoico. Son flujos locales, captados en arroyos y manantiales de corto recorrido (figuras 2 y 4).

Grupo 2: Esquistos, areniscas y calizas de la formación Manacas.

Subgrupo 1. Flujos locales de corto recorrido captados en arroyos y pozos (Fig. 2).

Subgrupo 2. Flujos locales de mediano recorrido captados en arroyos manantiales (Fig. 2).

Grupo 3: Esquistos y areniscas de la formación San Cayetano.

Subgrupo 1. Flujo local captado en un pozo (Fig. 4).

Subgrupo 2. Flujos locales captados en manantiales y pozos (Figuras 2, 3, 5).

Grupo 4: Calizas masivas de la formación Guajaibón.

Subgrupo 1. Flujos locales captados en cuevas (Fig. 1).

Subgrupo 2. Flujos locales captados en manantiales (Fig. 1).

Subgrupo 3. Flujos locales captados en emergencias (surgencias y resurgencias) cársicas.



M. Rodríguez y otros

Grupo 5: Calizas masivas y estratificadas de las formaciones Sierra Azul y Lucas. Se incluyen las aguas más profundas que interactúan con brechas y calcarenitas de la formación Cacarájicara.

Subgrupo 1. Flujos locales captados en surgencias cársicas (Fig. 2).

Subgrupo 2. Flujos intermedios captados en manantiales (Fig. 2).

Tabla 1. Inventario de puntos de agua de la Sierra del Rosario

Grupo	Formación geológica	Litología	Sub grupo	Flujo	Recorrido	Captación	No	N	TSS
0						Lluvia	0	4	26
1	Asoc. Ofiolítica	Serpentinitas	1	FL	Corto	Arroyos	5-9	17	329
2	Fm. Manacas	Esquistos, areniscas y calizas	1	FL	Corto	Arroyos y pozos	1-2	5	134
			2	FL	Medio	Arroyos y manantiales	3-4	31	412
3	Fm. San Cayetano	Esquistos y areniscas	1	FL	Corto	Pozo	53	1	345
			2	FI	Medio	Manantiales y pozos	54-56	11	1284
4	Fm. Guajaibón	Calizas masivas	1	FL	Corto	Cuevas	10-13	21	240
			2	FL	Corto	Manantiales	14-18	14	366
			3	FL	Corto	Surgencias y resurgencias	19-23	94	298
5	Fms. Sierra Azul, Lucas y Cacarájicara	Calizas estratificadas, calcilitas y calcarenitas	1	FL	Corto	Manantial	24-27	6	454
			2	FI	Medio	Manantial	28	1	696
6	Fm. Artemisa	Calizas estratificadas	1	FL	Corto	Manantiales y pozos	29-40, 30A	37	479
			2	FL	Corto	Resurgencias	41-42	6	306
			3	FI	Medio	Manantiales y pozos	43-47	25	622
		4	FI	Medio	Manantiales y pozos	48-52	9	743	
7	Fm. Artemisa (drenaje profundo y de mayor recorrido)	Calizas, esquistos y areniscas y rocas ultrabásicas	1	FR	Largo y profundo	Manantiales y pozos	57-67	70	2237
			2	FR	Variado en profundidad	Manantiales y pozos	68-72	5	1859

FL: flujo local; FI: flujo intermedio; FR: flujo regional.

Grupo 6: Calizas estratificadas de la formación Artemisa. Se incluyen aguas que drenan a mayor profundidad y hacen contacto con otras litologías, como son las rocas ultrabásicas y los esquistos y areniscas.

Subgrupo 1. Flujos locales captados en manantiales, pozos y emergencias cársicas (Fig. 1).

Subgrupo 2. Flujos locales e intermedios captados en resurgencias cársicas (Fig. 3).

Subgrupo 3. Flujos intermedios captados en manantiales y pozos (Figuras 3 y 4).

Subgrupo 4. Flujos intermedios que interactúan con otras litologías, captados en manantiales y pozos (Figuras 3 y 4).



M. Rodríguez y otros

Grupo 7. Se agrupan los flujos que drenan calizas la formación Artemisa, pero son de carácter más regional y de circulación profunda, cuyas características químicas difieren del resto de las aguas que discurre por la Fm. Artemisa, ya que son de tipo sulfatadas en lugar de bicarbonatadas como las anteriores. Estas aguas son captadas en manantiales surgentes o pozos artesianos.

Subgrupo 1. Flujos intermedios y regionales de recorrido más profundo, captados en pozos y manantiales (Fig. 4).

Subgrupo 2. Agua de un pozo (p 1) de este grupo captado a diferentes profundidades (Fig. 4).

ORIGEN DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL SISTEMA DE FLUJOS

Con el objetivo de explicar el origen de la composición química de las aguas correspondientes al sistema de la Sierra del Rosario, se aplicaron los métodos de balance de masas y mezcla de agua. Los principales procesos hidrogeoquímicos que se toman en cuenta se muestran en la tabla 2.

El origen de la composición química de las aguas del grupo 1, formada por flujos locales de composición $\text{HCO}_3\text{-Mg}$, que drenan los macizos ultrabásicos (Tabla 1), se explica principalmente mediante procesos de disolución de serpentinita y consumo de CO_2 biogénico, acompañados de disolución de halita, calcita y oxidación de pirita e intemperismo de plagioclasas. En la tabla 3 (muestra 1) se observa la magnitud de las masas disueltas o transferidas en dichos procesos.

La composición química de los flujos locales que discurren por los macizos constituidos por los esquistos y areniscas de la formación Manacas (grupo 2, tabla 1), los cuales poseen facies hidroquímicas del tipo bicarbonatadas cálcicas sódicas, se origina principalmente por disolución de calcita y dolomita, así como intemperismo de plagioclasa (anorthita, albita) y serpentinita a expensas de CO_2 de carácter biogénico. También contribuyen al origen de la composición química de estas aguas la disolución de halita, el intemperismo de microclino y la oxidación de pirita. En la tabla 3 se muestra las masas de sustancia disueltas o transferidas. Dichas magnitudes son mayores (muestra 8) o menores (muestra 6) en los flujos de mayor o menor recorrido respectivamente.

Los flujos locales e intermedios que discurren por los esquistos y areniscas de la Fm. San Cayetano (grupo 3, tabla 1) son de tipo bicarbonatadas sódicas. Su composición química se explica principalmente por la significativa disolución incongruente de plagioclasa y el aporte iónico de los procesos de disolución de halita, de intemperismo de microclino y serpentinita, y de la oxidación de pirita. En forma detallada estos procesos de transferencia de masas se ilustran en la tabla 3, donde se aprecia que el intemperismo es menor en los flujos locales (muestra 10) que en los flujos intermedios (muestra 11).

Teniendo en cuenta el bajo contenido de calcio en este tipo de sedimento, se excluyó la presencia de calcita, lo cual permitió estimar la composición de la plagioclasa en términos de albita y anorthita. La composición aproximada de dicho mineral en todos los casos fue de: $\text{Na}_{0,9}\text{Ca}_{0,1}\text{Al}_{1,1}\text{Si}_{2,9}\text{O}_8$.

Los principales procesos geoquímicos que originan la composición química de flujos locales de corto y mediano recorrido que drenan en la zona vadosa (epicarso) del sistema cársico del macizo del Pan de Guajaibón (grupo 4, tabla 1), son los siguientes: disolución de calcita y dolomita, consumo de CO_2 en la zona del suelo, seguidos de disolución de halita, transferencia plagioclasa – caolinita y oxidación de pirita. En la tabla 3 (muestras 14, 18 y 24) se muestran dichos procesos en forma detallada, así como las transferencias de masas correspondientes.



M. Rodríguez y otros

Tabla 3. Transferencia de masas mg/l en (%) originada por disolución o reacción química (+) o por precipitación o consumo (-) en los procesos geoquímicos que tienen lugar mediante procesos de interacción lluvia - roca (flujos locales e intermedios) en la Sierra del Rosario.

Proceso geoquímico	1	6	8	10	11	14	18	24	28	32	34	46	48	56	57	60	61
Halita	20.0 (7.2)	12.4 (13.6)	25.9 (7.5)	18.7 (3.5)	85.9 (5.7)	16.7 (13.0)	8.8 (6.1)	16.0 (8.2)	14.0 (6.7)	40.6 (5.8)	18.5 (5.7)	13.5 (6.6)	35.1 (4.7)	27.4 (5.2)	31.6 (1.8)	47.2 (2.5)	50.0 (1.9)
Calcita	15.3 (5.5)	15.0 (16.5)	85.2 (24.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	76.3 (59.5)	103.3 (71.9)	125.6 (64.5)	137.0 (65.8)	200.5 (28.5)	191.6 (58.8)	134.8 (65.7)	264.0 (37.8)	148.3 (28.3)	191.3 (11.1)	868.8 (36.1)	1054.1 (40.3)
Dolomita	0.0 (0.0)	29.0 (31.8)	75.7 (21.8)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	25.1 (19.6)	27.4 (19.1)	32.0 (16.5)	52.0 (25.0)	88.8 (12.6)	35.9 (11.0)	42.0 (20.5)	116.4 (15.5)	33.7 (6.4)	43.5 (2.5)	151.9 (8.2)	239.5 (9.1)
Serpentina	200.7 (72.8)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	11.9 (2.2)	72.7 (4.8)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	95.6 (18.2)	173.2 (10.1)	49.5 (2.7)	74.6 (2.8)
Plagioclasa	32.9 (11.9)	32.2 (35.4)	149.8 (43.1)	460.9 (86.6)	1191.4 (78.7)	6.7 (5.2)	3.7 (2.6)	14.7 (7.6)	2.1 (1.0)	296.7 (42.1)	55.4 (17.1)	0.0 (0.0)	265.4 (35.3)	126.0 (24.1)	659.9 (38.4)	377.6 (20.4)	314.9 (12.0)
Microclino	0.1 (0.0)	0.8 (0.9)	6.0 (1.7)	19.4 (3.6)	55.1 (3.6)	0.1 (0.1)	0.0 (0.0)	0.1 (0.0)	0.0 (0.0)	13.5 (1.9)	0.8 (0.3)	0.0 (0.0)	3.8 (0.5)	9.7 (1.9)	43.5 (2.5)	32.8 (1.8)	29.1 (1.1)
Pirita	7.0 (2.5)	1.5 (1.7)	4.8 (1.4)	21.6 (4.1)	87.7 (5.8)	3.3 (2.6)	0.5 (0.3)	6.3 (3.2)	3.0 (1.4)	58.2 (8.0)	23.1 (7.1)	14.0 (7.0)	36.5 (4.9)	56.9 (10.9)	379.8 (22.1)	505.3 (27.3)	836.2 (32.0)
H ₂ S	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	21.6 (1.4)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	8.1 (1.2)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	10.0 (1.3)	26.1 (5.0)	169.6 (11.4)	18.1 (1.0)	17.3 (0.7)
Total	(100)	(100)	(100)	(100)	(100)	(100)	(100)	(100)	(100)	(100)	(100)	(100)	(100)	(100)	(100)	(100)	(100)

1) M. Cajalbana 1; 6) M. Arroyo La Sed; 8) Sumidero Mamey; 10) Pozo P3 40 m; 11) M. Mil Cumbres Sulfuroso; 14) Cueva Lechuza; 18). M. Macagua; 24) Surgencia Ancón; 28). M. Lucas1; 32) M. Cacarajícara sulfuroso; 34) M. Mil Cumbres; 46) R. Taco Taco; 48) M. La Pastora; 56) M. Soroa; 57) Pozo El Sitio; 60) M. El Templado; 61) M. La Gallina; 64) Pozo P1 (237-320 m).



M. Rodríguez y otros

Las aguas del grupo 5 (tabla 1) la componen flujos locales e intermedios de tipo bicarbonatadas cálcicas y bicarbonatadas cálcicas sulfhídricas respectivamente. Discurren por sedimentos calcáreos de las formaciones Sierra Azul y Lucas, y a mayor profundidad actúan con brechas y calcarenitas de la Fm. Cacarajícara. Su composición se origina mediante procesos geoquímicos similares a las del grupo anterior (muestra 28, tabla 3), con la diferencia de que, en las de mayor recorrido (las que interactúan con los sedimentos de Cacarajícara), la transferencia de masa es mayor y además se produce H_2S por reducción parcial del sulfato previamente originado por la oxidación de pirita (muestra 32, tabla 3).

La composición química de los flujos locales del grupo 6 (tabla 1), los cuales drenan las calizas estratificadas de la Fm. Artemisa, también de tipo HCO_3-Ca , tiene su origen mediante procesos geoquímicos similares al de las restantes aguas carbonatadas. Los resultados del cálculo del balance de masa se exponen en la tabla 3 (muestras 34 y 46).

La composición química de las aguas correspondientes a los flujos intermedios que drenan las calizas de la Fm. Artemisa, también pertenecientes al grupo 6 (tabla 1), se explica mediante los procesos de disolución de halita, calcita y dolomita, y oxidación de pirita con reducción parcial de sulfato. Los resultados se muestran en la tabla 3 (muestra 48). Como el proceso de oxidación de pirita va acompañado de la generación de CO_2 , parte de la calcita disuelta pudiera formarse por consumo de CO_2 de tipo no biogénico.

Las aguas del grupo 6, que además de reaccionar con los carbonatos de la Fm. Artemisa, lo hacen con otras litologías, tales como rocas ultrabásicas, esquistos y areniscas (subgrupo 4, tabla 1), son del tipo bicarbonatada mixtas. El origen de la composición química de estas aguas se muestra en la tabla 3 en los ejemplos del manantial Soroa (muestra 56) y del pozo El Sitio (muestra 57), siendo este último el más representativo de este grupo. En la formación de su composición intervienen procesos hidrogeoquímicos similares a los del grupo 6 en tipo y magnitud, pero además ocurren procesos de intemperismo de serpentinita. En este grupo el aporte de los iones HCO_3^- y Mg^{2+} se debe tanto al proceso de intemperismo de la dolomita como de la serpentinita, lo cual se puede atribuir a la acción de estos flujos sobre los sedimentos carbonatados y las rocas ultrabásicas.

El grupo 7 (tabla 1) lo integran flujos de carácter más regional y profundo que, en su recorrido subterráneo, drenan calizas de la Fm. Artemisa (principalmente en la zona de alimentación del acuífero), y en profundidad interactúan con sedimentos de la Fm. San Cayetano. Originan aguas de tipos sulfatadas bicarbonatadas cálcicas, sulfatadas cálcicas y sulfatadas cálcicas sódicas. La composición química de las aguas del tipo sulfatadas cálcicas y sulfatadas bicarbonatadas cálcicas altamente mineralizadas se puede explicar, al igual que en el caso anterior, mediante procesos de disolución congruente de halita, calcita, dolomita y serpentinita, disolución incongruente de plagioclasas (albita, anorthita) y microclino, así como oxidación de pirita y reducción de sulfato. Estos procesos se muestran en detalle en la tabla 3 (muestras 60 y 61). En este caso, la magnitud de las masas disueltas o transferidas es elevada, especialmente producidas por disolución de calcita a expensas del CO_2 generado en el proceso de oxidación de pirita.

Otra forma de explicar el origen de las aguas del grupo 7, al menos las que corresponden al sistema hidrotermal San Diego de los Baños - Los Bermejales, es asumiendo la ocurrencia de procesos de mezcla de aguas. Así la composición química de las aguas de los tipos $HCO_3-Ca > Na$, $SO_4 > HCO_3-Ca$, $SO_4-Ca > Na$, $SO_4 > HCO_3-Ca > Na$ y las del tipo SO_4-Ca con más bajo contenido de minerales disueltos puede explicarse aplicando modelos de balance de masas y mezcla de aguas, mediante procesos similares a los descritos en el párrafo anterior, previa mezcla de miembros extremos de los tipos HCO_3-Ca y HCO_3-Na en diferentes proporciones (Fagundo et al, 2001; 2003).



CONCLUSIONES

El procesamiento mediante modelos hidrogeoquímicos de 376 datos de análisis químico de aguas muestreadas en la Sierra del Rosario entre 1984 y 2001, permitió identificar el sistema de flujos (locales, intermedios y regionales), establecer los patrones hidrogeoquímicos y determinar los procesos geoquímicos que explican el origen de la composición química de estas aguas.

En los acuíferos someros (zona no saturada o vadosa) y de pequeño recorrido (flujos locales), constituidos por carbonatos de las formaciones Guajaibón, Sierra Azul y Artemisa, los principales procesos geoquímicos que explican el origen de la composición química de las aguas (del tipo Ca-HCO₃) son la disolución de calcita y dolomita. En los acuíferos constituidos por rocas ultrabásicas (Asociación Ofiolítica), el intemperismo origina aguas Mg – HCO₃ cuyo origen se explica mediante la disolución de serpentinita; mientras que aquellos acuíferos compuestos de esquistos y areniscas producen por intemperismo aguas Ca > Na – HCO₃ (Fm. Manacas), Na – HCO₃ y Na – HCO₃ > Cl (Fm. Manacas), cuya composición se explica mediante procesos de disolución incongruente de plagioclasas. En todos los casos el contenido de SO₄²⁻ en las aguas se debe a la oxidación de pirita y el de SiO₂ a la disolución de sílice, la cual es mayor en los esquistos y areniscas.

En los acuíferos más profundos (zona de saturación y circulación profunda) y de extenso recorrido (flujos regionales), la composición química de las aguas de mayor mineralización originadas (Ca – SO₄), se explica mediante procesos de disolución congruente de halita, calcita, dolomita y sílice, disolución incongruente de plagioclasa, oxidación de pirita con reducción de sulfato; mientras otras aguas de menor mineralización, se originan mediante mezcla de aguas a partir de miembros extremos de la mezcla, con la intervención de procesos geoquímicos similares a los señalados anteriormente.

Las aguas con un recorrido de extensión y profundidad intermedio entre las dos anteriores (flujos intermedios) poseen una composición similar a las anteriores en las respectivas litologías, aunque localmente se obtiene aguas de carácter mixto con respecto a los aniones o cationes. Los procesos geoquímicos que originan estas aguas también son similares, pero en proporciones mayores de transferencia de masas a la de los flujos locales y en proporciones menores a la de los flujos regionales. Mediante la metodología empleada quedó demostrado que en la Sierra del Rosario la litología y estructura locales controlan el modo en que las aguas adquieren su composición química.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece la colaboración de la MSc. Ana Patricia Méndez Linares y de Ing. Manuel Figueroa, de la UNAM (México), por el procesamiento tecnológico de las bases cartográficas y geológicas, así como por la elaboración digital de los perfiles geológicos esquemáticos respectivamente.

BIBLIOGRAFÍA

1. Academia de Ciencias de Cuba (1988). Mapa geológico de Cuba. Escala 1: 250 000.
2. APHA-AWWA-WPCF, 1989, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 17 ed APHA, AWWA, WPCF. Washington.
3. Fagundo, J.R. (1998). Patrones hidrogeoquímicos y relaciones matemáticas en aguas naturales. Ingeniería Hidráulica, 19 (2): 62-78, ISSN 0253-0678.
4. Fagundo, J.R., J.J. Valdés, J. Rodríguez, J.M. Pajón, A. de la Cruz, A. García, M. Pulina, 1986. Estudio preliminar sobre el proceso de denudación cársica en el polígono cubano-polaco del Pan de Guajaibón. Voluntad Hidráulica, 70/71: 11-15.



M. Rodríguez y otros

5. Fagundo, J.R., J.E. Rodríguez, J.M. Pajón, E. Franco, G. Benítez, A.C. Rodríguez, J. Güerón e I. Abelló, 1993. 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. Jaime I, Castellón (España): 43-53.
6. Fagundo, JR, JE, Rodríguez, V Ferrera y P González, 1997. Geoquímica de acuíferos cársicos de la Sierra del Rosario, Pinar del Río, Cuba. En: Arellano, DM y Gómez-Martín, Editores. Investigaciones Hidrogeológicas en Cuba. Reprografía LANKOPY, SA, Bilbao (BI-2133-97). 135-149.
7. Fagundo, J.R., P. González, J. Carrillo, I. Antigüedad, R. Peláez, M. Suárez, Melián, R. Hernández, D. Cáceres. Caracterización del sistema de flujo local-regional de la Sierra del Rosario (Cuba) mediante modelos hidrogeoquímicos. Memorias Convención Ciencias de la Tierra, GEOMIN 2005, 28 Págs., ISBN 959-7117-03-7, 2005.
8. Fagundo-Sierra, J., J.R. Fagundo, P. González, M. Suárez, 2001. Modelación de las aguas naturales. En: Memorias del VII. Taller de la Cátedra de Medio Ambiente, ISCTN, La Habana 2001. ISBN 959-7136-13-9, 2001 (en soporte electrónico).
9. Franco, E., J.R. Fagundo, J.M. Pajón, 1987. Resultados de los estudios hidroquímicos realizados en el Pan de Guajaibón en el período Enero 28 a Febrero 17 de 1986. Revista Ciencias de la Tierra, 11, 17 p
10. González, P., M. Suárez, G. Benítez, J. Ramírez y J.R. Fagundo, 2000. Caracterización de aguas minerales de algunos yacimientos del país. Le Monde du Thermalisme. Ed. L' Organisation Mondiale du Thermalisme (O.M.Th). París (Francia), 14-15.
11. González, P., M. Llerena, M. Suárez, J.R. Fagundo, C. Melián, B. Luna, I. Herrera, 2001. 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. ISBN 959-7136-13-9 (en soporte electrónico).
12. Peláez, R, M. Olivares, M. del C. Núñez, y M. Valdivia, 1990. Informe sobre la búsqueda detallada y exploración orientativa de las aguas minero-medicinales San Diego Bermejales. Ministerio de la Industria Básica, Centro Nacional del Fondo Geológico, La Habana, Cuba. 159 p.
13. Pszczolkowski, A., 1978. Geosynclinal sequences of the Cordillera de Guaniguanico in western Cuba, their lithostratigraphy, facies development and paleogeography. Acta Geológica Polónica, 28 (1) 1-96.
14. Rodríguez, J.E. y J.R. Fagundo, 1995, Hydrology and dynamics of tropical karst processes in Cuba. Studia Carsologica (Brno) 6: 42- 54.