

PATRONES, PROCESOS Y ORIGEN DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL SISTEMA DE FLUJOS DE LA SIERRA DEL ROSARIO

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

1. Centro de Estudios de Medio Ambiente, 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

La Sierra del Rosario presenta un sistema de flujos de carácter local, intermedio y regional que interactúa con sedimentos de diferente naturaleza (carbonatos, areniscas y rocas ultrabásicas), cuya composición química está controlada por las características geológicas e hidrogeológicas de la región. En este trabajo se estudian los patrones hidrogeoquímicos de los diferentes flujos y los procesos geoquímicos que explican la composición de los diferentes tipos de agua.

INTRODUCCIÓN

En la Sierra del Rosario existen condiciones geológicas de carácter litológico (presencia de rocas carbonatadas, esquistos y areniscas, roca ultrabásicas) y estructural (fallas, escamas tectónicas, planos de estratificación) muy complejas, que establecen condiciones hidrogeológicas favorables para la ocurrencia de flujos de diferente naturaleza: locales, intermedios y de carácter más regional y profundo, todo lo cual determina que las aguas que discurren por los macizos y emergen en manantiales y surgencias o son captadas en pozos, posean diferente composición desde el punto de vista cualitativo y cuantitativo. La identificación de este sistema de flujos y su composición acorde a las características geológicas, hidrogeológicas y ambientales locales,

constituye el punto de partida para su integración óptima en los planes de desarrollo socio - económico de la región.

En trabajos previos se discuten los resultados de la caracterización hidrogeoquímica del sistema de flujos de la Sierra del Rosario, mediante la aplicación de modelos de tipo termodinámico (Fagundo et al, 2004 a; 2005 a; Rodríguez-Piña et al, 2005) y cinético (Fagundo et al, 2004 b). El objetivo de este trabajo es determinar los patrones hidrogeoquímicos correspondientes a los diferentes tipos de flujos que drenan las litologías presentes en este territorio; así como los procesos hidrogeoquímicos que explican la composición química de dichas aguas.

Localización, geología e hidrogeología del área de estudio.

La parte central del área de estudio se encuentra localizada aproximadamente a 100 km del sudoeste de la Ciudad de La Habana (figura 1) y ocupa una superficie de 1 125 km².

Las características geológicas de la Sierra del Rosario son una consecuencia del desplazamiento y transporte tectónico de rocas ocurrido durante el Eoceno Medio (Pszczoiowski, 1978; Academia de Ciencias, 1988).

En el área se aprecian tres unidades fisiográficas 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 (figura 2).

Las características generales de las unidades geológicas que afloran en el área se describen en la tabla 1.

Debido a la prevalencia del relieve cársico en la región, la infiltración de las precipitaciones a través de los macizos es instantánea y de carácter gravitatorio.

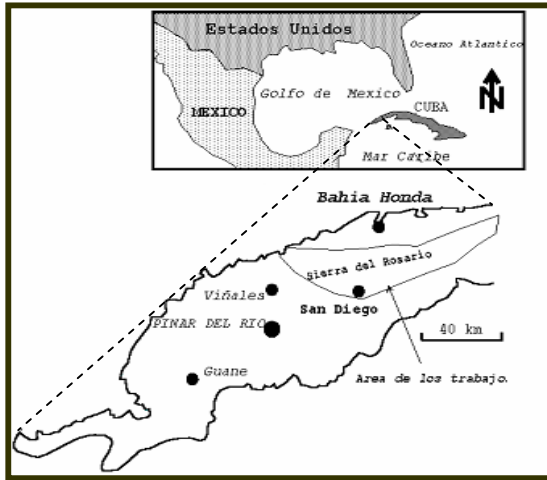
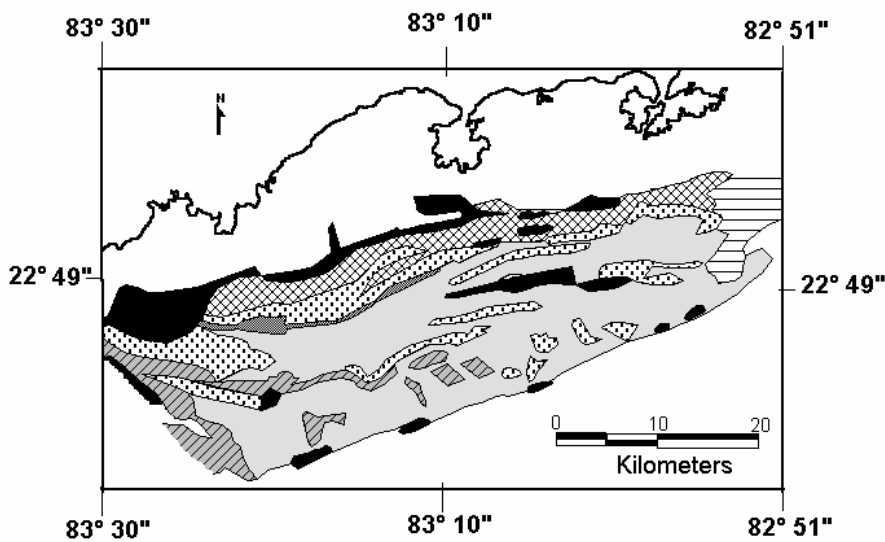


Figura 1. Esquema de ubicación de la Sierra del Rosario.



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 2. Esquema geológico con perfiles seleccionados para el estudio de la relación existente entre los patrones hidrogeoquímicos y la disposición de las secuencias estratigráficas de la Sierra del Rosario.

Tabla 1. Principales formaciones geológicas de la Sierra de Rosario y su litología

Símbolo	Edad	Formación	Litología
P ₁₋₂	Paleógeno (Eoceno ndiferenciado)	Fm. Manacas	Areniscas, esquistos, calizas, pedernales y olistostromas
K ₂ m	Cretácio superior	Fm. Cacarajicara	Brechas, calcarenitas, calcilutitas
K ₁₋₂ al-cm	Cretacico inferior -superior	Fm. Guajaibón	Calizas masivas, calcarenitas, biomicriticas a veces dolomitizadas.
K ₁₋₂	Cretácico inferior.-superior indiferenciado.	Fm. Sierra Azul	Calizas, calizas margosas, argilitas, silicitas
	Terrigeno -Carbonatado.	Fm. Martín Mesa	Calizas masivas y estratificados (biomicritas), calcarenitas,
K ₁ b-bm	Cretácico inferior	Fm. Lucas	Calizas (biomicritas) estratificadas, argilitas calcáreas.
J ₃ -K ₁ b	Jurásico superior - Cretácico inferior	Fm. Artemisa	Calizas estratificadas (micritas, biomicritas, calcilutitas y calcarenitas) con intercalaciones de silicitas en la parte superior.
J ₁ -J ₃ ox	Jurásico inferior - superior	Fm. San Cayetano	Areniscas, lutitas, argelitas, esquistos

ASOCIACIÓN OFIOLITICA MESOZOICA

σ			Serpentinitas, harzburguitas, Iherzolitas, wherlitas, dunitas serpentinizadas
---	--	--	---

MATERIALES Y MÉTODOS

Para el desarrollo de este trabajo se utilizaron 376 datos hidroquímicos, a partir de muestreos realizados entre los años 1984 y 2004 (Pulina y Fagundo, 1984; Franco, Fagundo y Pajón, 1987; Peláez et al, 1990; Fagundo et al, 1993; González et al, 2000), compilados en la base de datos TERMADAT (Fagundo-Sierra et al, 2002). En la tabla 2 se presenta de forma resumida el inventario de puntos de agua. En dicha tabla, los datos aparecen agrupados por formación geológica, o lo que es lo mismo, por litología o tipo de roca drenada por las aguas de lluvia.

Tabla 2. Resumen del inventario de puntos de agua de la Sierra del Rosario.

Grupo	Formación geológica	Litología	Subgrupo	Flujo	Recorrido	Captación	Muestra	N	SST
0						Lluvia	0	4	24
1	Asociación Ofiolítica	Serpentinitas		FL	Corto	Arroyos	5-9	17	329
2	Fm. Manacas	Esquistos, areniscas y calizas	1	FL	Corto	Arroyos y pozos	1-2	5	133
			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	1336
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 Cacarajícara	Calizas estratificadas, clacilitas y calcarenitas	1	FL	Corto	Manantial	24-27	6	424
			2	FI	Medio	Manantial	28	2	625
6	Fm. Artemisa	Calizas estratificadas	1	FL	Corto	Manantiales y pozos	29-40, 30A	37	482
			2	FL	Corto	Resurgencias	41-42	5	306
			3	FI	Medio	Manantiales y pozos	43-47	28	622
7	Fm. Artemisa y otras litologías	Calizas y mezcla de otras litologías		FI	Medio	Manantiales y pozos	48-52	9	715
8	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	84	2245
			2	FR	Variado en profundidad	Manantiales y pozos	68-72	5	1859

FL: Flujos locales, FI: Flujos intermedios, FR: Flujos regionales.

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 macroconstituyentes (Cl⁻, SO₄²⁻, Ca²⁺ y Mg²⁺) 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), adaptadas para condiciones de campo (Krawczyk, 1992). En el caso de los cationes (Na^+ y K^+), se empleó también la espectrofotometría de absorción atómica, con llama de aire-acetileno (espectrofotómetro de llamas de la firma PIE UNICAM). La calidad de los datos fue validada mediante dos métodos: balance de aniones y cationes y diferencia entre conductividad eléctrica real y teórica.

Los datos hidroquímicos fueron procesados mediante los programas de computación HIDROGEOQUIM (Fagundo et al, 2005 b) y MODELAGUA (Fagundo-Sierra et al, 2001). Se utiliza 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 (Rodríguez-Piña, 2005). Los datos hidroquímicos son expresados y representados mediante patrones hidrogeoquímicos (Fagundo, 1998).

RESULTADOS

En la figura 3 se presentan los patrones hidrogeoquímicos, representados mediante diagramas de Stiff, de los diferentes flujos que drenan la Sierra del Rosario.

Las aguas de los flujos locales que drenan las rocas ultrabásicas (figura 3, 1) son del tipo HCO_3^- -Mg y su patrón medio es 118-181. Los principales procesos geoquímicos que explican la composición de los flujos de carácter local son: disolución de serpentinita y en menor medida disolución de halita, oxidación de pirita e intemperismo de plagioclasas (tabla 3).

Las aguas de los flujos locales de corto y mediano recorrido que drenan los sedimentos de la Formación Manacas, son del tipo $\text{HCO}_3\text{-Ca}>\text{Na}$, con patrones hidrogeoquímicos 451-271 (Fig. 3, 2) y 352-181 respectivamente. Los principales procesos geoquímicos son: disolución de calcita y dolomita, así como intemperismo de plagioclasa y serpentinita a expensas de CO_2 de carácter biogénico (tabla 3). También contribuyen al origen de la composición química de estas aguas la disolución de halita, el intemperismo de microclino y la oxidación de pirita.

Las aguas de los flujos locales e intermedios que discurren por sedimentos de la Formación San Cayetano son del tipo $\text{HCO}_3\text{-Na}$ y $\text{HCO}_3>\text{Cl-Na}$. Poseen patrones hidrogeoquímicos 811-172 (figura 3, 3) y 811-271 respectivamente y su composición se explica mediante procesos geoquímicos de disolución incongruente de plagioclasa con el aporte iónico de los procesos de disolución de halita, de intemperismo de microclino y serpentinita, y de la oxidación de pirita (tabla 3). La composición de la plagioclasa, en términos de albita y anorthita, es: $\text{Na}_{0.9}\text{Ca}_{0.1}\text{Al}_{1.1}\text{Si}_{2.9}\text{O}_8$ (tabla 4).

Los flujos locales e intermedios que drenan carbonatos de las formaciones Guajaibón, Sierra Azul, Lucas y Artemisa son del tipo $\text{HCO}_3\text{-Ca}$, con patrones hidrogeoquímicos: 271-181 (figura 3, 5), 181-172, 181-271 y 271-181 (figura 3, 6). Las aguas que interactúan con los sedimentos de la Formación Cacarajícara son de tipo mixto ($\text{HCO}_3\text{-Ca}>\text{Na}$) y poseen patrón hidrogeoquímico 361-172 (figura 3, 4). Los principales procesos geoquímicos son: disolución de calcita y dolomita, consumo de CO_2 en la zona del suelo, seguidos de disolución de halita, transferencia de plagioclasa – caolinita y oxidación de pirita (tabla 3).

La composición química de los flujos locales que drenan las calizas estratificadas de la Formación Artemisa, también de tipo $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ (patrón 181-181), tiene su origen mediante

procesos geoquímicos similares al de las restantes aguas carbonatadas. Los flujos intermedios de esta litología se caracterizan por la presencia de H_2S y su composición y patrón hidrogeoquímico son similares al de los flujos locales. Además de la disolución de calcita y dolomita ocurren procesos de disolución de halita y oxidación de pirita con reducción parcial de sulfato (tabla 3).

Las aguas correspondientes a los flujos que drenan la Formación Artemisa con interacción con otras litologías (areniscas y rocas ultrabásicas) son bicarbonatadas mixtas ($HCO_3-Ca>Mg>Na$) y su patrón principal es 352-181 (figura 3, 7). La composición química de esta agua se explica mediante procesos de disolución de calcita, dolomita, serpentinita e intemperismo de plagioclasa, acompañados de oxidación de pirita con reducción parcial de sulfato (tabla 3).

Las aguas de mayor y profundo recorrido subterráneo son fundamentalmente SO_4-Ca con patrones 271-118 y 181-118 (figura 3, 8). La composición química de estas aguas 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 plagioclasa y microclino, así como oxidación de pirita y reducción de sulfato (tabla 3). 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.

En general, en las muestras estudiadas priman las aguas de tipo bicarbonatadas cálcicas, cuya composición se relaciona con los carbonatos de las formaciones Guajaibón y Artemisa. Con relación a la mineralización, son más abundantes las aguas que presentan una cantidad moderada de minerales disueltos.

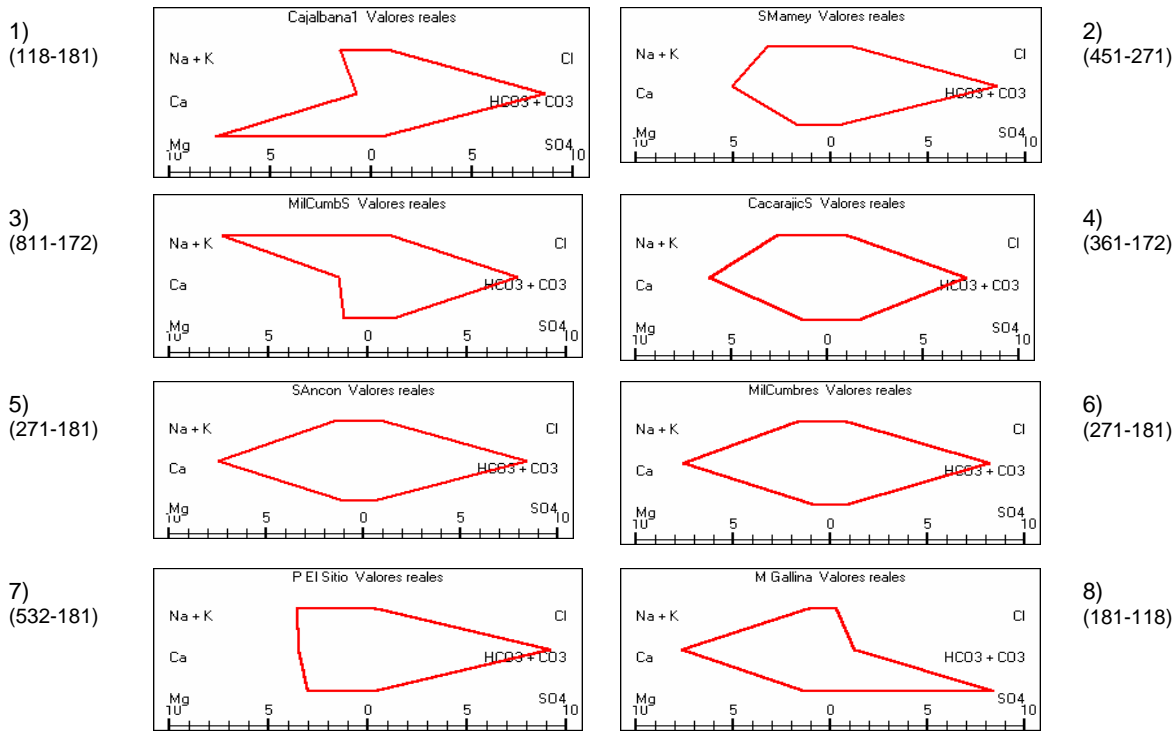


Figura 3. Patrones hidrogeoquímicos representados mediante diagramas de Stiff de los valores medios de los flujos de la Sierra del Rosario: 1) Flujos locales que drenan rocas ultrabásicas ($\text{HCO}_3\text{-Mg}$); 2) Flujos locales que drenan esquistos, areniscas y calizas de la Fm. Manacas. ($\text{HCO}_3\text{-Ca} > \text{Na}$); 3) Flujos intermedios que drenan esquistos y areniscas de la Fm San Cayetano. ($\text{HCO}_3\text{-Na}$, H_2S); 4) Flujos intermedios que drenan sedimentos de la Fm. Cacarájicara ($\text{HCO}_3\text{-Ca} > \text{Na}$, H_2S); 5) Flujos locales que drenan calizas de la Fm. Guajaibón ($\text{HCO}_3\text{-Ca}$); 6) Flujos locales que drenan calizas de la Fm. Artemisa ($\text{HCO}_3\text{-Ca}$, H_2S); 7) Flujos intermedios que drenan diferentes litologías ($\text{HCO}_3\text{-Na} > \text{Ca} > \text{Mg}$); 8) Flujos regionales que drenan calizas de la Fm. Artemisa e interactúan con otras litologías ($\text{SO}_4\text{-Ca}$, H_2S). Las concentraciones son expresadas en tanto por 10 de aniones y cationes.

Tabla 3. Transferencia de masa mg/l y 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 en la Sierra del Rosario.

Proceso geoquímico	5	1	3	53	54	10	14	20	24	28	30	41	43	51	52	59	60
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)

5) M. Cajalbana 1; 1) M. Arroyo La Sed; 3) Sumidero Mamey; 53) Pozo P3 40 m; 54) M. Mil Cumbres Sulfuroso; 10) Cueva Lechuza; 14). M. Macagua; 20) Surgencia Ancón; 24). M. Lucas1; 28) M. Cacarajícara sulfuroso; 30) M. Mil Cumbres; 41) R. Taco Taco; 43) M. La Pastora; 51) M. Soroa; 52) Pozo El Sitio; 59) M. El Templado; 60) M. La Gallina.

Tabla 4. Fórmulas de las plagioclasas de la Formación San Cayetano.

Punto de muestreo	$R = \frac{Na}{Ca}$	x	y	x+y	$A = \frac{x}{(x+y)}$	$B = \frac{y}{(x+y)}$	$C = \frac{(x+2y)}{(x+y)}$	$D = \frac{(3x+2y)}{(x+y)}$	$Na_A Ca_B Al_C Si_D O_8$
P 3-40 m	20.1	3.21	0.16	3.37	0.95	0.05	1.05	2.95	$Na_{0.95} Ca_{0.05} Al_{1.05} Si_{2.95} O_8$
P 4	13.5	9.31	0.69	10.00	0.93	0.07	1.07	2.93	$Na_{0.93} Ca_{0.07} Al_{1.07} Si_{2.93} O_8$
Mil Cumbres Sulfuroso	8.3	9.15	1.10	10.25	0.89	0.11	1.11	2.89	$Na_{0.89} Ca_{0.11} Al_{1.11} Si_{2.89} O_8$
Rancho Mar	7.3	14.61	1.99	16.60	0.88	0.12	1.12	2.88	$Na_{0.88} Ca_{0.12} Al_{1.12} Si_{2.88} O_8$
El Sitio	10.9	4.44	0.41	4.85	0.92	0.08	1.08	2.92	$Na_{0.92} Ca_{0.08} Al_{1.08} Si_{2.92} O_8$

Fórmula aproximada: $Na_{0.9} Ca_{0.1} Al_{1.1} Si_{2.9} O_8$

Relación molar media ($R = \frac{Na}{Ca}$) de la Fm. San Cayetano = 12.3

Relación molar media ($R = \frac{Ca}{Mg}$) de la Fm Artemisa = 8.1

CONCLUSIONES

Las propiedades químico-físicas de los flujos que drenan la Sierra del Rosario dependen de las interacciones agua-roca durante el tiempo de contacto que media desde la infiltración hasta su emergencia y de la constitución de los materiales acuíferos. Es posible caracterizar los diferentes flujos (locales, intermedios y regionales) sobre la base de un grupo de indicadores geoquímicos.

La composición química de estas aguas responde a esa complejidad litológica y estructural y puede expresarse en términos de patrones hidrogeoquímicos. La misma depende de la litología, las características de la tectónica local, el tipo de flujo, el régimen de lluvia y en menor escala de los efectos antrópicos.

Las principales facies hidroquímicas son: bicarbonatadas cálcicas (carbonatos), bicarbonatadas sódicas (esquistos y areniscas), bicarbonatadas magnésicas (rocas ultrabásicas) y bicarbonatadas mixtas (mezcla de litologías) en acuíferos drenados por flujos locales e intermedios; sulfatadas cálcicas, sulfatadas bicarbonatadas cálcicas y cálcicas sódicas en acuíferos libres o confinados drenados por flujos regionales. Mientras que la mineralización y el contenido de gases disueltos son menores en los flujos locales, en los de tipo intermedio y regional, la mineralización es superior, con relativamente elevados contenidos de CO_2 y H_2S disueltos.

En los acuíferos someros 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 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$) son la disolución de calcita y dolomita; en los acuíferos constituidos por rocas ultrabásicas (Asociación Ofiolítica), el intemperismo origina aguas $\text{HCO}_3\text{-Mg}$ cuyo origen se explica mediante la disolución de serpentinita; mientras que aquellos acuíferos compuestos de

esquistos y areniscas producen por intemperismo aguas $\text{HCO}_3\text{-Ca}>\text{Na}$ (Formación Manacas), $\text{HCO}_3\text{-Na}$ y $\text{HCO}_3\text{-Cl-Na}$ (Formación San Cayetano), cuya composición se explica mediante procesos de disolución incongruente de plagioclasas. En todos los casos el contenido de SO_4^{2-} en las aguas se debe a la oxidación de pirita, el cual es mayor en los esquistos y areniscas.

En los acuíferos más profundos y de extenso recorrido (flujos regionales), la composición química de las aguas de mayor mineralización originadas ($\text{SO}_4\text{-Ca}$), se explica mediante procesos de disolución congruente de halita, calcita y dolomita, disolución incongruente de plagioclasa, oxidación de pirita con reducción de sulfato con mayores valores de transferencia de masa que los restantes flujos.

BIBLIOGRAFÍA

Academia de Ciencias de Cuba (1988). Mapa geológico de Cuba. Escala 1: 250 000.

APHA-AWWA-WPCF, 1989, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 17 ed APHA, AWWA, WPCF. Washington. Appelo C. A. J. and D. Postma, 1993. Geochemistry, Groundwater and Pollution. Ed. Balkema, Rotterdam, Netherlands, 536 p.

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 cársticas cercanas a la Sierra del Rosario. En: Libro de Comunicaciones I Taller sobre Cuencas Experimentales en el Karst, Matanzas 1992). Ed. Univ. Jaume I, Castellón (España): 43-53.

Fagundo, J.R. (1998). Patrones hidrogeoquímicos y relaciones matemáticas en aguas naturales. Ingeniería Hidráulica, 19 (2): 62-78, ISSN 0253-0678. ISSN 0253-0678.

Fagundo, J.R., J. J. Carrillo-Rivera, I. Antigüedad, P. González, R. Peláez, M. Suárez, Cl. Melián, R. Hernández, D. Cáceres (2004 a). Caracterización hidrogeoquímica del sistema de

flujo local-regional de la Sierra del Rosario (Cuba). En: Proceeding del XXXIII Congress AIH "Groundwater Flow Understanding: From Local to Regional Scale, 4 pp, México. ISBN: 970-32-1749-4.

Fagundo, J.R., P. González, M. Rodríguez-Piña, M. Suárez, C. Melián (2004 b). Aplicaciones de la cinética en la hidrogeología y el medio ambiente. Contribución a la Educación y la Protección Ambiental, Vol. 5, X Taller. ISCTN, 220 pp. ISBN 959-7136-20-1.

Fagundo, J.R., P. González, J. Carrillo, I. Antigüedad, R. Peláez, M. Suárez, Melián, R. Hernández, D. Cáceres (2005 a). 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 pp. ISBN 959-7117-03-7.

Fagundo J.R., P. González, M. Suárez Muñoz, J. Fagundo-Sierra, C. Melián, E. Alvarez (2005 b). HIDROGEOQUIM. Contribución a la Educación y Protección Ambiental. Vol 6. ISBN 959-7136-24-4.

Fagundo-Sierra, J., J.R. Fagundo, P. González, M. Suárez (2001). Modelación de las aguas naturales. Contribución a la Educación y la Protección Ambiental, Vol. VII. ISCTN, La Habana 2001. ISBN 959-7136-13-9.

Fagundo-Sierra, J., J.R. Fagundo, P. González, M. Suárez, C. Melián (2002). Sistema de base de datos de aguas minerales y mineromedicinales (TERMADAT). Contribución a la Educación y la Protección Ambiental, Vol. VIII. ISBN 959-7136-13-9.

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 pp.

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.

Krawczyk, W. (1992). Methods of field analytic of karst water. In: *Hydrochemical methods in dynamic geomorphology*. Scientific Works of Silesian University in Katowice, Katowice, (1254), 65-83.

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 pp.

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.

Pulina, M., Fagundo, J.R. (1984). The Dynamics of Contemporary Karst Processes in the Tropical Area of Cuba. Preliminary report of the field investigations performed by the Expedition GUAJAIBON'84 in the winter season 1984. Ed. Univ. Slaski. Sosnowice, 42 pp.

Rodríguez-Piña, M. (2005). Aplicaciones de la Química Física en la caracterización del sistema de flujos de la Sierra del Rosario, Pinar del Río. Tesis de Maestría en Medio Ambiente y Desarrollo. Centro de Estudios de Medio Ambiente, (UH).

Rodríguez-Piña, M., J. R. Fagundo, P. González, J.R. Hernández-Santana , J. Carrillo-Rivera, I. Antigüedad, A. Abraham, M. Suárez, C. (2005). patrones y procesos hidrogeoquímicos de la Sierra del Rosario y su relación con el medio ambiente geológico. *Contribución a la Educación y Protección Ambiental*. Vol 6. ISBN 959-7136-24-4.