

ORIGEN DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LAS AGUAS NATURALES Y MINERALES PROCEDENTES DE ACUÍFEROS CARBONATADOS EN LA SIERRA DEL ROSARIO.

J. R. Fagundo Castillo¹, P. González Hernández¹, M. Suárez Muñoz¹, J. Fagundo Sierra¹, C. Melián Rodríguez¹, M. Llerena Portilla².

¹ Centro Nacional de Termalismo “Víctor Santamarina”. Ave: 243, No 19815, Fontanar, Boyeros Ciudad Habana. C.P 19250. E-mail: reynerio@infomed.sld.cu; ² Instituto de Geografía Tropical.

Resumen

Aplicando métodos de balance de masas, se determina el origen de la composición química de manantiales y pozos en terrenos carbonatados, cuyas aguas proceden de las zonas no saturada, saturada y de saturación y circulación profunda, en la Sierra del Rosario, Pinar del Río. Los principales procesos geoquímicos que determinan el modo en que estas aguas adquieren su composición química son: disolución congruente de calcita, dolomita y halita; disolución incongruente de plagioclasas, (albita y microclino) serpentina y minerales aluminosilícicos; oxidación de pirita; reducción de sulfatos; generación de CO₂ en las zonas más someras y precipitación de SiO₂ en la zona de saturación y circulación profunda.

Palabras Claves: balance de masas, procesos geoquímicos, acuíferos carbonatados, acuíferos cársicos, origen de la composición química.

Abstract.

The chemical composition origin of the springs and wells at carbonate terrains, which waters are from no saturated, saturated as well as deep saturated and circulation zones at Sierra del Rosario are determined applying a mass balance model. The main geochemical process which control the chemical composition acquisitions mode are: congruent dissolution of calcite, dolomite, and halite; incongruent dissolution of plagioclase minerals (albite and microcline); pyrite oxidation, sulfate reduction, CO₂ generation at the shallow zone, and SiO₂ precipitation at deep saturation and circulation zones.

Key words: mass balance, geochemical process, carbonate aquifer, karstic aquifer, chemical composition origin.

Introducción

En la subregión natural de las Montañas de la Sierra del Rosario (Gutiérrez y Glean, 1999), situada en la porción oriental de la Cordillera de Guaniguanico, entre la parte oriental de la provincia de Pinar del Río y la parte occidental de la provincia La Habana, existe un gran potencial de aguas naturales y minerales, que pueden tener uso como fuentes de abasto a pequeñas poblaciones rurales, para el regadío en la agricultura, para consumo mediante embotellamiento y para fines terapéuticos.

La cantidad y diversidad de las aguas de esta región está asociada a las complejas condiciones geológicas e hidrológicas existentes, como consecuencia del desplazamiento y transporte tectónico de rocas de diferente naturaleza litológica (calizas, pizarras, areniscas y rocas ultrabásicas), ocurrido durante el Eógeno Medio, así como la presencia de numerosas fallas orientadas en diferentes direcciones (Pszczoikowski, 1978).

El objetivo de este trabajo es determinar el modo en que estas aguas adquieren su composición química aplicando un modelo de balance de masas.

Materiales y Métodos

Las mediciones de los parámetros geoquímicos se realizaron “*in situ*” mediante pHmetro y medidor de temperatura y potencial redox (Eh) modelo HI-8424 de la marca HANNA. Los contenidos de CO₂ y H₂S, así como la alcalinidad total (HCO₃⁻ y CO₃²⁻) fueron también determinados en el campo (Krawczyk, 1992), mientras que los restantes macroconstituyentes (Cl⁻, SO₄²⁻, Ca²⁺ y Mg²⁺) y componentes trazas se analizaron en el laboratorio antes de las 24 horas de tomadas las muestras. Las marchas analíticas se efectuaron mediante las técnicas estandarizadas (APHA, AWWA, WPCF, 1992).

Las muestras fueron tomadas entre enero de 1984 y enero del 2000, los datos procesados mediante un software, basado en un modelo hidrogeoquímico de balance de masas, implementado especialmente para los objetivos. Este software es novedoso y este trabajo constituye uno de los

primeros en que el mismo es empleado, así como el modelo de balance de masas en que el mismo se basa.

Resultados y Discusión

Las rocas carbonatadas se encuentran muy extendidas en la Sierra del Rosario, constituyendo más del 65%. En ellas se originan acuíferos cársicos libres o confinados, en dependencia de las condiciones de yacencia de estos materiales con respecto a otras rocas menos permeables. Las aguas de estos acuíferos pueden proceder de la zona no saturada (acuíferos colgados o vadosos), de la zona saturada o de la zona de saturación y circulación profunda; estas últimas se caracterizan por presentar elevados contenidos de minerales y gases disueltos (Fagundo et al, 1996) además de una temperatura mayor debido al calentamiento por el gradiente geotérmico. Algunas de estas fuentes poseen propiedades mineromedicinales reconocidas, como es el caso de los manantiales del Balneario de San Diego de los Baños.

Como ejemplos representativos de estos tres tipos de acuíferos se seleccionaron el manantial Mil Cumbres, el manantial La Pastora y el pozo artesiano P1, respectivamente. Todos estas fuentes tienen en común el hecho de que se encuentran asociadas a las calizas de la Fm. Artemisa. La composición química de estas aguas, se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Composición química de las aguas de varias fuentes de la Sierra del Rosario cuyas cuencas de alimentación se encuentran en terrenos carbonatados. Concentraciones en mmol/l.

No	pH	CO ₂	H ₂ S	H ₄ SiO ₄	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	TSS
1	6.60	0.05	0.00	0.00	0.20	0.16	0.00	0.04	0.03	0.21	0.01	20
2	7.42	0.37	0.00	0.48	4.44	0.48	0.39	2.14	0.23	0.93	0.03	438
3	7.15	1.71	0.50	0.50	7.24	1.31	0.66	3.51	0.66	1.31	0.04	739
4	7.19	0.89	0.73	0.40	3.36	1.22	18.36	14.44	2.63	6.98	0.18	2818

1) Agua de lluvia – San Juan de Sagua (N=5); 2) Manantial Mil Cumbres (N=18); 3) Manantial La Pastora (N=5); 4) Pozo P1 (N=10). La incertidumbre de los resultados corresponde al error de los métodos analíticos que del orden de 0.05 mol/l.

La composición química de las aguas del manantial Mil Cumbres es predominantemente del tipo bicarbonatada cálcica, aunque ocasionalmente por efecto de las precipitaciones puede transformarse en bicarbonatada cálcica sódica ($CV_{TSS}=13\%$). Otro rasgo que caracteriza a estas aguas es su relativamente baja temperatura, su poco contenido de CO_2 , ausencia de H_2S , así como sus bajas concentraciones de cloruro y sulfato.

En la tabla 2 se muestran los resultados del balance de masas correspondiente al proceso de intemperismo que origina la composición química de las aguas del manantial Mil Cumbres, así como los procesos geoquímicos correspondientes.

Tabla 2. Balance de masas y procesos geoquímicos producidos por extracción de las lluvias en sedimentos de la formación Artemisa (Manantial Mil Cumbres). Concentraciones en mmol/l.

MUESTRA	H_4SiO_4	H_2S	CO_2	HCO_3	Cl	SO_4	Ca	Mg	Na	K
Mil Cumbres	0.48	0.00	0.37	4.44	0.48	0.39	2.14	0.23	0.93	0.03
Lluvia	0.00	0.00	0.05	0.20	0.16	0.00	0.04	0.03	0.21	0.01
f=3.0										
Δ iónico	0.48	0.00	0.32	3.84	0.00	0.39	2.02	0.14	0.30	0.00
Procesos geoquímicos:										
1)	0.00	0.00	-1.88	3.76	0.00	0.00	1.88	0.00	0.00	0.00
2)	0.00	0.00	-0.29	0.59	0.00	0.00	0.15	0.15	0.00	0.00
3)	0.51	0.00	-0.25	0.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.25	0.00
4)	0.00	0.00	0.77	-0.77	0.00	0.38	0.00	0.00	0.00	0.00
5)	0.00	0.00	1.98	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
TOTAL	0.51	0.00	0.32	3.84	0.00	0.38	2.03	0.15	0.25	0.00
ERROR	-0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	-0.01	-0.01	0.05	0.00

1) Disolución de calcita; 2) disolución de dolomita; 3) disolución incongruente de albita; 4) oxidación de pirita; 5) generación de CO_2 biogénico.

Para el cálculo de la masa extraída en forma iónica por las lluvias, se tomó en consideración el factor de evapotranspiración:

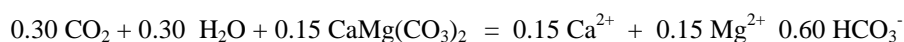
$$f = \frac{\text{Contenido de Cl medio de la fuente } 0.48}{\text{Contenido de Cl medio de la lluvia } 0.16} = \frac{0.48}{0.16} = 3.0$$

El producto de este factor por la composición química del agua de lluvia se resta de la composición química del agua del manantial, obteniéndose así una diferencia (Δ iónico), correspondiente a la masa resultante en el balance, la cual es debida al intemperismo. En el caso de gases no se tiene en cuenta este factor.

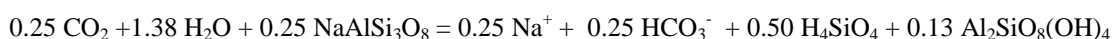
Como se desprende de los resultados presentados en la tabla 2, los procesos geoquímicos que explican la composición química de estas aguas pueden expresarse mediante las siguientes ecuaciones:



Calcita

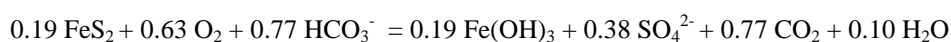


Dolomita



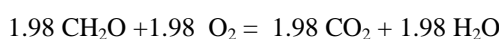
Albita

Caolinita



Pirita

Hematita



La masa de mineral disuelto o transformado es:

	<u>mmol/l</u>	<u>mg/l</u>	<u>%</u>
Calcita:	1.88	188.00	63.8
Dolomita:	0.15	18.60	6.3
Albita:	0.25	65.50	22.2
Pirita:	0.19	<u>22.80</u>	<u>7.7</u>
		294.90	100

La composición química del manantial La Pastora, de tipo bicarbonatada cálcica, es más estable en el tiempo que la del manantial Mil Cumbres ($C.V_{TSS} = 4.4\%$). Presenta también una temperatura media anual mayor, contenidos más elevados de CO_2 y minerales disueltos (TSS , Ca^{2+} , SO_4^{2-}), así como presencia abundante de H_2S .

Para calcular la masa extraída en el proceso de intemperismo en el caso del manantial La Pastora, se tomó en cuenta el procedimiento utilizado por Garrels y Mckencie (en Denver, 1982), el cual consiste en restar a la composición química de un manantial permanente, la de un manantial no permanente. En este caso, a la composición del manantial La Pastora (zona de saturación) se le restó la composición del manantial Mil Cumbres (zona no saturada). Los métodos de balance de masas constituyen una herramienta adecuada para estudiar los procesos geoquímicos en yacimientos carbonatados (Hidalgo et. al, 1997). Los resultados del balance de masas aplicado en este trabajo se muestran en la tabla 3.

Si se resta la composición química del manantial La Pastora a la del pozo P1, se puede determinar la cantidad de material adquirido o eliminado en el tránsito de estas aguas, desde la zona de saturación, hasta la zona de saturación y circulación profunda. Los resultados del balance de masas correspondiente se presentan en la tabla 4.

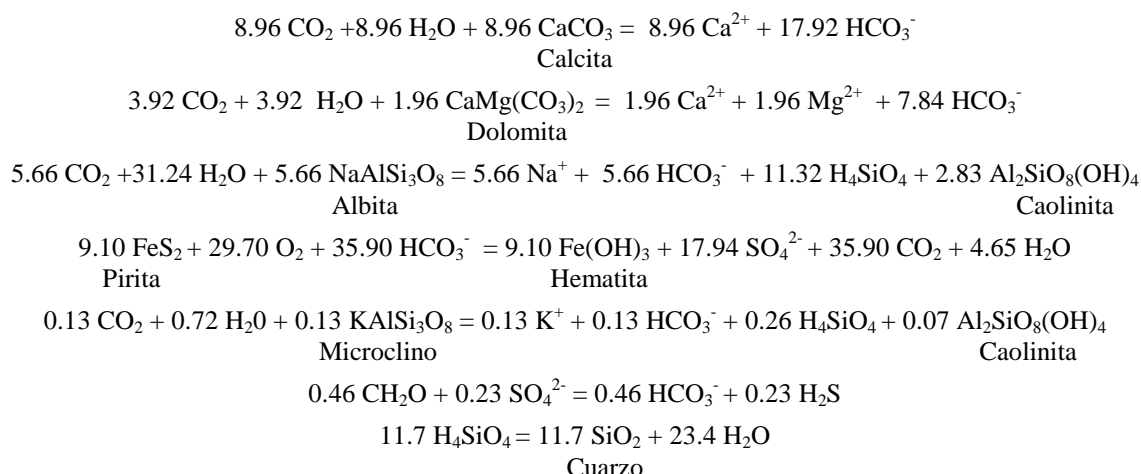
En este tránsito, la composición química de las aguas varía desde bicarbonatada cálcica a sulfatada cálcica. Como no existe yeso ni anhidrita en la región, la fuente de sulfatos es la propia caliza de la Fm. Artemisa, la cual libera H₂S al ser triturada. Los procesos químicos que explican la composición de estas aguas, según se infiere en la tabla 4, son los siguientes: disolución congruente de calcita y dolomita, disolución incongruente de albita y fedelspato K (microclino), oxidación de pirita con reducción parcial de sulfato, precipitación de cuarzo y liberación de CO₂,

Tabla 4. Balance de masas y procesos geoquímicos producidos por intemperismo en sedimentos de la formación Artemisa (Pozo P1) en la zona de saturación y circulación profunda del acuífero. Concentraciones en mmol/l.

MUESTRA	H ₄ SiO ₄	H ₂ S	CO ₂	HCO ₃	Cl	SO ₄	Ca	Mg	Na	K.
Pozo P1	0.40	0.73	0.89	3.36	1.22	18.36	14.44	2.63	6.98	0.18
La pastora	0.50	0.50	1.71	7.24	1.31	0.66	3.51	0.66	1.31	0.04
Δ IÓNICO	-0.10	0.23	-0.82	-3.88	-0.09	17.70	10.93	1.97	5.67	0.14
Procesos geoquímicos:										
1)	0.00	0.00	-8.96	17.92	0.00	0.00	8.96	0.00	0.00	0.00
2)	0.00	0.00	-3.92	7.84	0.00	0.00	1.96	1.96	0.00	0.00
3)	11.32	0.00	-5.66	5.66	0.00	0.00	0.00	0.00	5.66	0.00
4)	0.26	0.00	-0.13	0.13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.13
5)	0.00	0.00	35.9	-35.9	0.00	17.94	0.00	0.00	0.00	0.00
6)	0.00	0.23	0.00	0.46	0.00	-0.23	0.00	0.00	0.00	0.00
7)	-11.7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8)	0.00	0.00	-18.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
TOTAL	-0.10	0.23	-0.82	-3.88	0.00	17.71	10.92	1.96	5.66	0.13
ERROR	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.09	-0.01	0.01	0.01	0.01	0.01

1) Disolución de calcita; 2) disolución de dolomita; 3) disolución incongruente de albita; 4) disolución incongruente de microclino; 5) oxidación de pirita; 6) reducción de sulfato; 7) precipitación de sílice; 8) liberación de CO₂.

Estos procesos ocurren según las siguientes ecuaciones:



La masa de material disuelto o transformado es:

	<u>mmol/l</u>	<u>mg/l</u>	<u>%</u>
Calcita:	8.96	896.00	24.0
Dolomita:	1.96	243.63	6.5
Albita:	5.66	1482.92	39.7
Pirita:	9.10	1092.91	29.3
Microclino:	0.07	<u>19.46</u>	<u>0.5</u>
		3774.92	100.0

Tabla 5. Balance de masas neto en las tres zonas hidrogeológicas (no saturada, saturada y de saturación y circulación profunda). Concentraciones en mg/l.

Material	Formula empírica	Zona no saturada	Zona saturada	Zona de saturación y circulación profunda	Total
Halita	NaCl	0 (0 %)	35.70 (100 %)	0 (0 %)	35.70
Calcita	CaCO ₃	188.0 (16 %)	94.0 (8 %)	896.0 (76 %)	1178.0
Dolomita	CaMg(CO ₃) ₂	18.6 (6 %)	48.50 (16 %)	243.63 (76 %)	310.73
Albita	NaAlSi ₃ O ₈	65.50 (4 %)	0 (0 %)	1482.92 (96 %)	1548.42
Microclino	KAlSi ₃ O ₈	0 (0 %)	0 (0 %)	19.46 (100 %)	19.46
Pirita	FeS ₂	22.80 (2 %)	49.20 (4 %)	1092.91 (94 %)	1164.91
Formación de H₂S	H ₂ S	0 (0 %)	17.0 (70 %)	7.36 (30 %)	24.36
Cuarzo	SiO ₂	0 (0 %)	0 (0 %)	702.0 (100 %)	702.0
Dióxido de carbono	CO ₂	87.2 (58 %)	63.36 (42 %)	-792.0 (-100 %)	

El balance neto de las tres zonas hidrogeológicas se muestra en la tabla 5. A partir de la información que recoge la misma, se puede estimar la proporción en que cada uno de los materiales es transformado en cada zona hidrogeológica como resultado del proceso de intemperismo: la halita sólo se disuelve en la zona no saturada; 16 % de calcita se disuelven en la zona no saturada, 8 % en la zona saturada y 16 % en la zona de saturación y circulación profunda; la dolomita se disuelve en las proporciones de 6%, 6 % y 78 % respectivamente; la albita se disuelve en forma incongruente

(dejando caolinita en el terreno como residuo) en las proporciones 4 %, 0 % y 96 %; el microclino también se disuelve incongruentemente en similar forma a la albita, pero sólo en la zona de saturación y circulación profunda, la pirita se oxida a sulfato (con producción de hematita) en las proporciones de 2 %, 4 % y 94 %; se reduce sulfuro a partir de la materia orgánica presente en el acuífero, por acción de las bacterias anaeróbicas sulforeductoras (Appelo y Postna, 1993) en las zonas saturada y de saturación y circulación profunda en las proporciones de 70 % y 30 %. El CO₂ de carácter biogénico es generado por las bacterias en mayor cuantía en las zonas más someras (58 % en la zona no saturada y 42 % en la zona saturada), mientras que en la zona más profunda no hay producción microbiológica de este gas, el cual tiende a liberarse a la atmósfera. Finalmente, se produce precipitación de sílice en la zona del drenaje más profundo.

La ocurrencia de piritas puede estar asociada tanto a las calizas fétidas de la formación Artemisa que constituyen el material acuífero, como a los polimetales que por lo general yacen en los sedimentos de la formación San Cayetano, los cuales forman parte de las capas confinantes del acuífero. La alta proporción en que este mineral es oxidado produce un elevado contenido de CO₂, hecho que puede explicar las altas concentraciones de minerales disueltos en esta zona profunda en forma congruente (calcita, dolomita y halita) y en forma incongruente (albita y microclino). Otro factor que favorece la disolución de los aluminosilicatos es la temperatura, la cual en la región de San Diego de Baños del orden de 46 °C a unos 300 m de profundidad (Peláez et al., 1990).

Conclusiones

En las zonas no saturada, saturada y de saturación y circulación profunda de los acuíferos carbonatados de la Sierra del Rosario existen aguas de los tipos bicarbonatadas cálcicas, bicarbonatadas cálcicas sulfhídricas y sulfatadas cálcicas sulfhídricas respectivamente, estas últimas con propiedades mineromedicinales. El origen de la composición química de estas aguas se debe a la ocurrencia de procesos de disolución congruente de calcita, dolomita y halita; a la disolución incongruente de albita y microclino; a procesos de redox que implican oxidación de pirita y reducción parcial de sulfatos; así como de procesos de generación biogénica de CO₂ y de

precipitación de sílice, especialmente en la zona más profunda. Mientras que los procesos microbiológicos que producen CO₂ y reducción de sulfato son más intensos en los acuíferos más someros, la oxidación de pirita es mayor en los acuíferos más profundos, originando una disolución adicional de los minerales carbonatados y silícicos.

Bibliografía

- Appelo C. A. J. and D. Postma (1993). "Geochemistry, Groundwater and Pollution". Ed. Balkema, Rotterdam, Netherlands, 536 Págs.
- 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.
- Fagundo, J.R., J. J. Valdés y J. E. Rodríguez (1996). "Hidroquímica del Karst". En: Libro de Comunicaciones. I Taller Internacional sobre Cuencas Experimentales en el Karst. Ediciones Osuna, Granada (España), 212 Págs.
- Drever, J. I. (1982). "The geochemistry of natural waters". Printice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 437 Págs.
- Gutiérrez, R. y M. R. Glean (1999). "Regiones Naturales de la Isla de Cuba". Ed. Científico Técnica. Ciudad de la Habana, 145 Págs.
- Hidalgo, D., F. López-Vera, C. Gómez y J. A. Iglesias (1997). "Balance de masas a lo largo de las aguas subterráneas del acuífero cástico de Torrelaguna". I Congreso Ibérico de Geoquímica, VII Congreso de Geoquímica de España. Ed. CEDEX, Soria (España), 375-383.
- Krawczyk, W. (1992). "Methods of field analytics of karst waters" In: Hydrochemical methods in Geomorfology. Scientifics Work of Silesian University in Katowice, Katowice (1254), 65-83
- Peláez, R., Ma. de la C. Olivárez, R. Núñez y M. Valdivia (1990). "Informe para la búsqueda detallada – exploración orientativa de las aguas minero – medicinales de San Diego – Bermejales". Unión Geológica (Fondo Geológico Nacional), MINBAS, Cuba, 159 Págs.
- Pszczoikowski A. (1978). "Geosynclinal sequences of the Coordillera de Guaninuanico in Western Cuba, their lithostratigraphy, facies development and paleogeography". Acta Geologica Polonica (Varsovia, Polonia), 28 (1) : 1-98