

HIDRODINÁMICA GEOQUÍMICA DEL SISTEMA ACUÍFERO DE LA COSTERA SUR DE CAMAGÜEY, CUBA

G. Yera Digat⁽¹⁾ y L.F. Molerio León⁽²⁾

(1) Dirección Provincial de Recursos Hidráulicos de Camagüey. Complejo Hidráulico Oeste

(2) Centro de Hidrología y Calidad de las Aguas (CENHICA), Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos

RESUMEN

Aplicando técnicas de análisis multivariado se definen las principales características del proceso de adquisición de la composición química de las aguas en el acuífero cársico de la costera sur de la provincia de Camagüey. Se definen tres factores que interesan las variables derivadas de la interacción agua dulce-agua salada en el sistema acuífero afectadas, en alguna medida, por la geometría de los puntos de suministro de información.

Palabras clave: intrusión salina, análisis factorial, carso.

ABSTRACT

Applying multivariate statistics the main characteristics of the factors controlling the process of acquisition of the chemical composition of groundwaters in the southern coastal aquifer of Camagüey, Cuba, are briefly described. Three main factors comprise the most important variables deriving the interaction between fresh and sea waters, locally affected by the geometrical properties of the information sources.

Key words: sea water intrusion, factor analysis, karst.

INTRODUCCIÓN

Sobre el basamento Pirenaico-Ilírico se desarrolla la cobertura platafórmica del Neógeno, de carácter neoa autóctono del Mioceno temprano, que yace en todo el sur de la provincia de Camagüey (fig. 1), y también al suroeste, en el límite con la provincia de Ciego de Avila. Dicha cobertura la componen dos formaciones, Arroyo Palma y Güines que pueden llegar a alcanzar espesores entre 250 y 300 m. Esta cobertura yace discordante sobre el substrato (fig. 2).

La Formación Arroyo Palma, de edad Mioceno inferior-medio, comprende un conjunto de aleurolitas blancuzcas hasta amarillo cremoso o arcillas y margas muy calcáreas, sin estratificación Clara, y calizas arcillosas cavernosas, con distribución regular tanto en dirección vertical como horizontal.

El ambiente de acumulación de los sedimentos de esta Formación se supone de aguas neríticas, platafórmicas, en condiciones de bahías tranquilas, con predominio de sedimentación lodosa-carbonatada en algunos lugares calcarenitas. Transiciona, a veces, hacia las facies periarrecifal. Al comienzo del Mioceno temprano predominaba la deposición de sedimentos gruesos, alimentada por el proceso de erosión activa en las tierras colindantes, a consecuencia del avance de la transgresión; con el avance de esta, se

impone una nueva sedimentación de tipo pelítico -carbonatada, donde las dos componentes estaban en equilibrio oscilatorio.

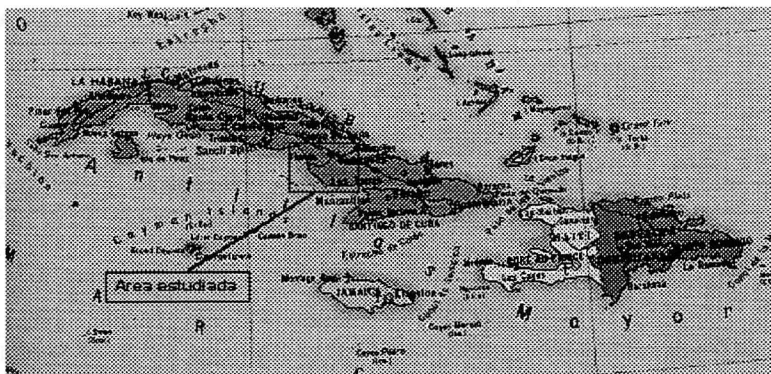


Fig 1. Mapa de localización.



Fig. 2. Mapa geológico del territorio estudiado.

La Formación Arroyo Palma, de edad Mioceno inferior-medio, comprende un conjunto de aleurolitas blancuzcas hasta amarillo cremoso o arcillas y margas muy calcáreas, sin estratificación Clara, y calizas arcillosas cavernosas, con distribución regular tanto en dirección vertical como horizontal.

El ambiente de acumulación de los sedimentos de esta Formación se supone de aguas neríticas, platafórmicas, en condiciones de bahías tranquilas, con predominio de sedimentación lodosa-carbonatada en algunos lugares calcarenitas. Transiciona, a veces, hacia las facies periarrecifal. Al comienzo del Mioceno temprano predominaba la deposición de sedimentos gruesos, alimentada por el proceso de erosión activa en las tierras colindantes, a consecuencia del avance de la transgresión; con el avance de esta, se

impone una nueva sedimentación de tipo pelítico -carbonatada, donde las dos componentes estaban en equilibrio oscilatorio.

Puede estar cubierta por fm. Güines o por depósitos más jóvenes del Cuaternario.

La formación Guines se descubre en muchos pozos o calas del territorio, se compone de calizas fuertes, masivas, cristalinas, blancas hasta rosadas, muy cavernosas, con organismos marinos y lentes de arcillas .

Están las rocas fuertemente recrystalizadas o dolomitizadas y en la parte inferior de la formación se intercalan desde calizas arcillosas hasta margas; este fenómeno también ocurre en la cercanía de las transiciones laterales hacia la formación Arroyo Palma, aunque en nuestro territorio casi siempre Guines yace concordante sobre Arroyo Palma y raramente discordante y transgresivamente sobre rocas paleogénicas (Eoceno medio). El ambiente de sedimentación probablemente fuera de aguas someras, cálidas, tranquilas, hasta moderadamente agitadas.

Por su parte los depósitos del Cuaternario están pobremente estudiados y en la vertiente sur de Camaguey están divididos en depósitos intermedios y depósitos de formaciones insulares.

ANÁLISIS FACTORIAL

Para el análisis factorial se seleccionaron once variables, ocho de las cuales corresponden a la mineralización (SST) y siete macroconstituyentes principales (HCO₃, SO₄, Cl, Ca, Mg, Na y K), mientras los tres restantes son de tipo geométrico, y consideran la cota topográfica (CT), profundidad total del pozo (PT) y distancia a la costa de la estación de monitoreo (D_Mar). Estas ascienden a 42 pozos en el área de estudio, de manera que la matriz de evidencias se compone de 42 x 11 = 462 elementos.

La tabla 1 muestra la matriz de los coeficientes de correlación lineal.

	HCO ₃	Cl	SO ₄	Ca	Mg	Na	K	SST	PT	CT	D_Mar
HCO ₃	1.0	.0	.38	.07	.19	.13	.06	.19	.25	.29	.2
Cl		1.0	.77	.77	.92	.96	.50	.97	.11	.29	.3
SO ₄			1.0	.46	.77	.89	.60	.87	.22	.22	.3
Ca				1.0	.71	.62	.15	.75	.16	.09	.1
Mg					1.0	.89	.44	.94	.11	.26	.3
Na						1.0	.58	.98	.15	.26	.3
K							1.0	.53	.01	.32	.3
SST								1.0	.08	.23	.3
PT									1.0	.25	.2
CT										1.0	.8
D_Mar											1.0

Tabla 1. Coeficientes de correlación lineal.

Destaca, en la tabla 1, la independencia relativa del HCO₃ respecto al resto de las variables, máxime tratándose de un acuífero cársico donde es de esperar que la contribución a la mineralización total de las aguas (SST) venga definida por un aporte importante de la disolución de los carbonatos. La posición, totalmente subordinada, del HCO₃ al Cl y SO₄, indica que la hidrodinámica geoquímica del acuífero en el sector

muestreado depende de los factores que controlan la presencia de ambos iones en el sistema.

En tal sentido, parece evidente que el aporte de Cl en la composición de la hidrodinámica del sistema pudiera provenir de intrusión marina y debía, por ello, esperarse una relación estrecha entre variables como la profundidad total o la distancia a la costa del punto muestreado que, sin embargo, no destaca en el examen de la matriz. No obstante, el predominio de iones asociados al intercambio agua dulce-agua salada, con elevados coeficientes de correlación, como en el caso de SO_4 , Mg y Na, inducen a suponer que la fuente de control de la composición química de las aguas mezcla asociada al aporte de estas a la mezcla total proveniente de una fuente de suministro independiente de las precipitaciones o de otro tipo de mezcla que no sea la de agua de mar.

Por razón de la hipsometría del territorio, la fuerte correlación entre la cota topográfica y la distancia a la costa, es un resultado esperado, ya que se trata de una llanura con suave , pero constante pendiente al mar.

La solución de la matriz en término de determinación de sus valores propios ofreció los resultados que se presentan en la tabla 2.

Componente	Valor propio	% varianza	Varianza acumulada
1	.031	52.5	52.5
2	.211	18.5	70.9
3	5.773	9.6	80.6
4	1.056	8.7	89.2
5	.155	6.3	95.5
6	.0000806	1.9	97.4
7	.099	1.4	98.8
8	.00019	.9	99.7
9	2.034	.3	99.99
10	.952	.001	99.99
11	.688	.0007	100.00

Tabla 2. Valores propios y varianza explicada.

De ella puede derivarse dos importantes conclusiones, la primera indica que bajo el criterio de aceptación de valores propios que cumplan la condición $\lambda \geq 1$ tres (3) factores resumen todas las variables de la matriz de evidencias que permiten explicar el 80.6% de la varianza total. Un valor de 0.95 pudiera ser tomado como límite inferior y entonces, puedes explicar hasta el 89.2% de la varianza total. En ambos casos, el alto valor explicado permite aceptar la composición de evidencias representada en la matriz observacional.

Atendiendo a ello, se prepararon dos tests de análisis factorial en modo variable (AF-R), uno con tres factores y otro con cuatro. Las comunalidades estimadas para las dos variantes se presentan en la tabla 3.

Como puede apreciarse, no hay cambios notables en la comunalidad de SST, que se mantiene como el patrón de discriminación más importante. Igualmente, HCO_3 , Cl, SO_4 , Ca, Mg y Na apenas sufren variación. Sin embargo, destaca, especialmente, el efecto sobre la profundidad total, cuyo peso, ahora, con cuatro factores, adquiere un especial significado por encima, incluso, de otros índices geoquímicos. Tal resultado, sugiere que la selección de cuatro factores permite incluir elementos geométricos en la matriz de

transición que, por ello, pudieran ser importantes para explicar el control que tales variables ejercen sobre la hidrodinámica geoquímica del sistema.

Variable	3 factores	4 factores
HCO ₃	.78	.79
Cl	.98	.99
SO ₄	.91	.94
Ca	.85	.87
Mg	.89	.9
Na	.94	.95
K	.58	.63
SST	.99	.99
PT	.3	.96
CT	.81	.90
D_Mar	.81	.89

Tabla 3. Comunalidades estimadas.

Las figs. 3 y 4 muestran la distribución de las variables sobre el plano factorial I-II, una vez rotadas las matrices estandarizadas por el método Varimax.

Seleccionando tres factores, la tabla 4 muestra la composición y peso de las variables que las conforman.

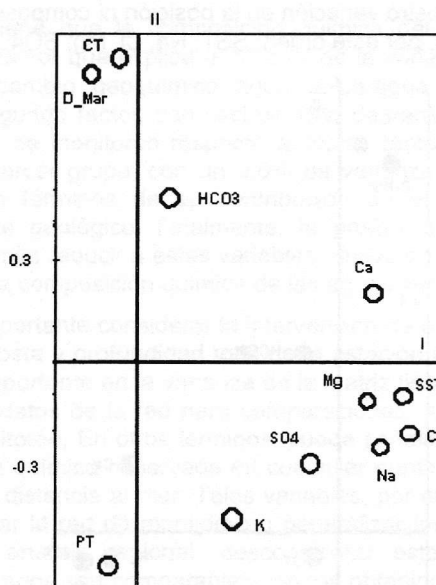


Fig. 3. Plano factorial para tres factores (rotación Varimax).

En el primer factor predominan las variables asociadas a la fuente de suministro de iones cloruro que influyen en la mineralización total, en particular el Mg y Na. La aparición

del Ca puede deberse a sustitución iónica. La posición del Mg en la escala de informatividad sugiere que, en la actualidad, existe un proceso de adquisición de Mg por sustitución del Ca, que bien pudiera estar ajustado a la mezcla de aguas dulces y salobres y, en menor medida a de dolomitización.

Variable	Factor 1	Variable	Factor 2	Variable	Factor 3
Cl	.966	CT	.883	HCO ₃	.776
SST	.945	D_Mar	.863	SO ₄ (?)	.615
Mg	.908				
Ca	.891				
Na	.888				

Tabla 4. Matriz factorial rotada (Varimax) para tres factores principales.

Las variables del segundo factor también favorecen el criterio de que el proceso de adquisición de la composición química actual se encuentra dominado por la intrusión marina, sobre todo, por la segunda variable, que considera la distancia al mar del punto de muestreo. En este test, por su parte, el papel de CT no está muy claro.

En el tercer factor, finalmente, predomina, de modo absoluto, el HCO₃, indicando la composición base del acuífero carbonatado. Incluir el SO₄ no haría más que confirmar el papel de la intrusión marina en el proceso pero, su peso informativo, es bastante menor y puede no necesariamente estar incluida en este factor.

La matriz no rotada no mostró variación en la posición ni composición de los factores 2 y 3. En el factor 1 aparecieron, por este orden: SST, Na, Cl, Mg, SO₄.

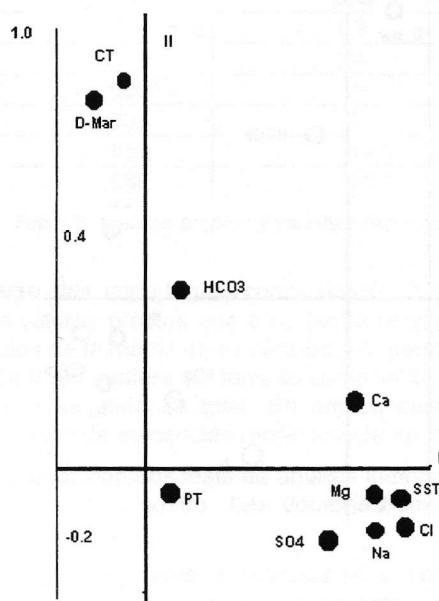


Fig. 4. Plano factorial para cuatro factores.

Por su parte, la tabla 5 muestra la matriz factorial para cuatro factores.

Variable	Factor 1	Variable	Factor 2	Variable	Factor 3	Variable	Factor 4
Cl	.966	CT	.932	HCO ₃	.814	PT	.965
SST	.954	D_Mar	.911				
Mg	.915						
Na	.903						
Ca	.866						

Tabla 5. Matriz factorial rotada (Varimax) para cuatro factores principales.

Obsérvese que la composición de los tres primeros factores no varía. En el primer factor solamente cambia la posición del Na y el Ca, de manera que ratifica el predominio de los iones asociados a la intrusión marina en el proceso de adquisición de la composición química de las aguas subterráneas. En el tercer factor, el SO₄, que había sido tomado con reservas en la rotación para tres factores, ahora, definitivamente, no interviene de modo significativo en la hidrodinámica geoquímica del sistema.

Por otro lado, al seleccionarse cuatro factores aparece, en el cuarto, PT como variable de consideración, lo que ahora, es un resultado que confirma su importancia en la caracterización del sistema.

NOTA FINAL

De este modo se tiene que la composición química del acuífero investigado viene definida por un primer factor que explica el 52.5 % de la varianza total y que concierne a los procesos de intercambio geoquímico agua dulce-agua salada, por presencia de intrusión marina. Un segundo factor, con casi un 19% de varianza explicada se debe a la posición de la estación de monitoreo respecto al litoral, tanto en términos hipsométricos como de distancia; el tercer grupo, con un 9,6% de varianza, viene representado por el aporte del acuífero en términos de su contribución en el HCO₃ de las calizas que predominan en el corte geológico. Finalmente, la profundidad total, con un 8.7% de varianza explicada, permite reducir a estas variables, nueve en total, la comprensión de los factores que controlan la composición química de las aguas subterráneas.

Es especialmente importante considerar la intervención de elementos geométricos como la cota, distancia a la costa y profundidad total de la estación de monitoreo. El hecho que ellas tengan un peso importante en la varianza de la matriz tiene implicaciones importantes respecto al uso de los datos de la red para comparaciones, asociaciones e incluso, para optimizar la red de monitoreo. En otros términos, puede señalarse que al menos la tercera parte de la composición química observada en cualquier punto del sistema, dependerá de la altura, profundidad y distancia al mar. Tales variables, por ello, deben ser consideradas al momento de rediseñar la red de monitoreo o generalizar los resultados. Resta validez, por ello, a cualquier análisis regional, desconsiderar estos factores en el análisis hidroquímico. Los resultados son comparables con los obtenidos por Arellano et al (1993), Molerio (1992, 1993a, 1993b).

BIBLIOGRAFÍA

ARELLANO ACOSTA, DANIELA M.; B. DEGOURNAY; J. GUTIÉRREZDÍAZ; L.F. MOLERO LEÓN; O. ASCANIO & A. SANTOS (1993): Isotope Hydrogeochemistry in the Study of Saline Aquifers. Case of Study-Isle of Youth, Cuba. Symp. Isotope Tech. in the Study of Past and Current

Environmental Changes in the Hydrosphere and the Atmosphere, IAEA, Vienna, Paper IAEA-SM-329/27P, 514-516

MOLERIO LEÓN, LESLIE F. (1992): Composición Química e Isotópica de las Aguas de Lluvia de Cuba. II Cong. Espel. Latinoamérica y el Caribe, Viñales, Pinar del Río, Cuba, 20-21

MOLERIO LEÓN, LESLIE F. (1993): Dinámica del Flujo Regional en el Macizo Metamórfico de la Isla de la Juventud. Taller sobre Aplicación de Técnicas Isotópicas en el Estudio de los Recursos y la Contaminación de las Aguas, OIEA, Maracaibo, Venezuela, 14:

MOLERIO LEÓN, LESLIE F. (1993): Factores de Control de la Variación de Cloruros en un Acuífero Cársico Tropical. II Jornadas Venezolanas de Geología Ambiental, Maracaibo, Venezuela, 10: