

Caratteri idrogeochimici e origine della composizione chimica di acque sotterranee carbonatiche

Juan Reynerio Fagundo Castillo¹, Vilma Monteagudo Zamaora², Mónica Rodríguez Piña³, Tamara Leonarte Pérez⁴, Otilio Beato Mesa⁴, Patricia González Hernández¹, Margaret Suárez Muñoz¹, Clara Melián Rodríguez¹, Ana Abraham Alonso⁵

¹ Centro Nacional de Medicina Natural y Tradicional.

² Instituto Superior Pedagógico de Las Tunas.

³ Centro de Estudios de Medio Ambiente.

⁴ Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos.

⁵ Instituto de Geografía Tropical.

Riassunto

Il contributo descrive i caratteri idrogeochimici e i tipi di acque sotterranee di Cuba che drenano depositi carbonatici, rappresentativi di flussi di differente natura, e ne determina l'origine della composizione chimica. I campioni analizzati corrispondono a sedimenti miocenici della provincia di Matanzas, a marmi giurassici della Isla de la Juventud e a depositi carbonatici del massiccio Cretaceo di Las Tunas. I flussi che interessano questi sedimenti presentano caratteri idrogeochimici tipici di acque bicarbonato-calciche o calcico-magnesiache in funzione della relazione calcite-dolomite del materiale acquifero. Altri caratteri riflettono l'effetto della intrusione marina o la salinità della zona di alimentazione dell'acquifero. I processi geochimici che spiegano la composizione di queste acque sono: dissoluzione di calcite e dolomite dove non esiste contatto con l'acqua marina; invece, predominano i processi di dissoluzione o precipitazione di calcite e dolomite, interscambio ionico e ossidazione di pirite o riduzione anaerobica di solfato negli acquiferi costieri con intrusione marina.

Parole chiave: geochimica, acquiferi carsici, Cuba

Abstract - HYDROGEOCHEMICAL PATTERNS AND ORIGIN OF THE COMPOSITION OF CARBONATE GROUNDWATERS

The present contribution deals with the hydrogeochemical patterns and the types of groundwaters at Cuba which drain carbonate deposits. The samples analyzed in this study derive from Miocene sediments of the Matanzas province, Jurassic marbles from Isla de la Juventud, and carbonate deposits of the Cretaceous massif of Las Tunas. Water flows in these sediments have hydrogeochemical characters typical of bicarbonate-calcium or calcium-magnesian waters, depending upon the calcite-dolomite relation within the aquifer. Other characters reflect the effect of sea water intrusion or the salinity of the recharge area of the aquifer. The geochemical processes which may explain the water composition are: dissolution of calcite and dolomite where there is no contact with sea water; on the other hand, processes of dissolution or precipitation of calcite and dolomite, ionic interchange and oxidation of pyrite or anaerobic reduction of sulfates, predominate in the coastal aquifers with sea water intrusion.

Key words: geochemistry, karst aquifers, Cuba

Introduzione

Le acque sotterranee acquisiscono la loro composizione chimica mediante un processo complesso, nel quale intervengono fattori di tipo chimico-físico, geologico, idrogeologico, geomorfologico, climatico, pedologico e antropico, tra gli altri (Fagundo, 1990).

I processi chimico-físici sono governati da leggi termodinamiche (Fagundo, 1996), e in ogni momento la composizione chimica dell'acqua è il risultato di interazioni più o meno prolungate dei flussi con il mezzo drenato. La litologia determina, in generale, le facies idrochimiche dominanti in una determinata regione, vale a dire il tipo di acqua o le caratteristiche idrogeochimiche, mentre i fattori restanti esercitano la loro influenza sul contenuto dei minerali disciolti. Infine, va sottolineato il ruolo esercitato dal fattore antropico nella composizione chimica dell'acqua. L'attività umana causa un progressivo deterioramento della qualità delle acque superficiali e sotterranee.

Così come dimostrato da Chebotarev (in Freeze & Cherry, 1980) mediante l'analisi di oltre 10000 campioni di acqua di pozzo, gli anioni nelle acque sotterranee tendono a evolvere chimicamente approssimativamente in tale maniera: $\text{HCO}_3^- \rightarrow \text{SO}_4^{2-} \rightarrow \text{Cl}^-$. Queste variazioni si verificano nella misura in cui l'acqua si muove da zone di grande flusso (flussi locali), attraverso zone intermedie (flussi intermedi), verso zone dove i flussi sono scarsi e l'acqua è considerata vecchia dal punto di vista geologico (flussi regionali).

A Cuba, le acque sotterranee che interessano i terreni carbonatici sono distribuite praticamente su tutto il territorio. In generale, esse hanno origine meteorica, comprese le acque minerali, e la loro composizione è da porre in relazione con i processi di interazione acqua-roccia con i materiali del mezzo geologico drenato, attraverso un percorso sotterraneo più o meno lungo, da quando si infiltrano nella zona di alimentazione dell'acquifero fino a che emergono come sorgenti o sono captate da pozzi. Nel caso di acque minerali, le emergenze sono associate a dislocazioni tettoniche o a contatti litologici locali.

Il presente contributo intende studiare i modelli idrogeochimici e l'origine delle acque sotterranee di Cuba che drenano rocce carbonatiche di età compresa tra il Giurassico e il Neogene (Fig. 1), la loro evoluzione chimica attraverso il percorso sotterraneo, i processi geochimici che spiegano la composizione delle stesse, così come la relazione tra detta composizione e il mezzo geologico drenato. Questo lavoro è parte di una più ampia ricerca che comprenderà la caratterizzazione idrogeochimica di flussi di differente tipologia che drenano altre litologie.

Materiali e metodi

La costituzione litologica delle differenti formazioni geologiche è stata ricavata dalla Carta Geologica di Cuba, in scala 1:250.000 (Academia de Ciencias de Cuba, 1989).

Parte dei dati idrochimici utilizzati per sviluppare il presente lavoro corrisponde al database del INRH (Istituto Nacional del Recurso Hidraulico). Le analisi chimiche sono state realizzate mediante tecniche standards (APHA, AWWA, WPCF, 1992).

La qualità dei dati è stata controllata per mezzo di bilanci di anioni e cationi. Quindi, utilizzando il sistema informatico HIDROGOQUIM (Fagundo et al., 2005), è stata effettuata una verifica tra la conduttività elettrica reale e quella teorica, eliminando i dati di scarsa qualità. Mediante lo stesso programma sono stati realizzati i vari calcoli geochimici.

Per la classificazione delle acque è stato utilizzato il metodo idrochimico di Kurlov. I caratteri idrogeochimici e i processi geochimici che spiegano l'origine della composizione chimica delle acque sono stati determinati mediante il sistema informatico MODELAGUA (Fagundo-Sierra et al., 2001), basato su modelli di riconoscimento dei caratteri, bilanci di massa e di miscela di acque.

Applicando MODELAGUA, la composizione chimica dell'acqua è stata caratterizzata attraverso determinate relazioni ioniche o idrogeochimiche proposte da Fagundo (1998). Tali

caratteri consistono in relazioni stechiometriche del tipo Na + K: Mg: Cl: HCO₃: SO₄. Su questa base si stabiliscono 729 andamenti (27x27 combinazioni numeriche formate per numeri interi da 1 a 9).

Risultati e discussione

Con l'obiettivo di studiare i caratteri idrogeochimici e l'origine della composizione chimica delle acque sotterranee di Cuba che drenano sedimenti carbonatici, sono stati presi in esame i dati idrochimici di campioni rappresentativi delle diverse formazioni geologiche di Cuba costituite da calcari e dolomie. Ai fini del loro analisi, i dati sono stati suddivisi in tre gruppi sulla base del tipo di sedimento e dell'intervallo di età geologica secondo il seguente criterio: calcari, calcari dolomitici e dolomie di origine sedimentaria del Miocene, dei bacini M-1 e M-5 del nord di Matanzas; calcari metamorfosati della Isla de la Juventud e calcari del massiccio cretaceo di Las Tunas.

Calcari del Neogene-Quaternario (nord della provincia di Matanzas)

I sedimenti carbonatici dell'intervallo Neogene-Quaternario sono quelli maggiormente distribuiti in tutto il paese (Fig. 1). Con l'obiettivo di caratterizzare le acque che drenano questi depositi dal punto di vista idrogeochimico, è stato selezionato un gruppo di pozzi ubicati nei bacini idrogeologici M-1 e M-5, nel nord della provincia di Matanzas. La tabella 1 mostra i risultati della caratterizzazione idrochimica delle acque per uso potabile selezionate per questo studio, che drenano depositi carbonatici del Miocene.

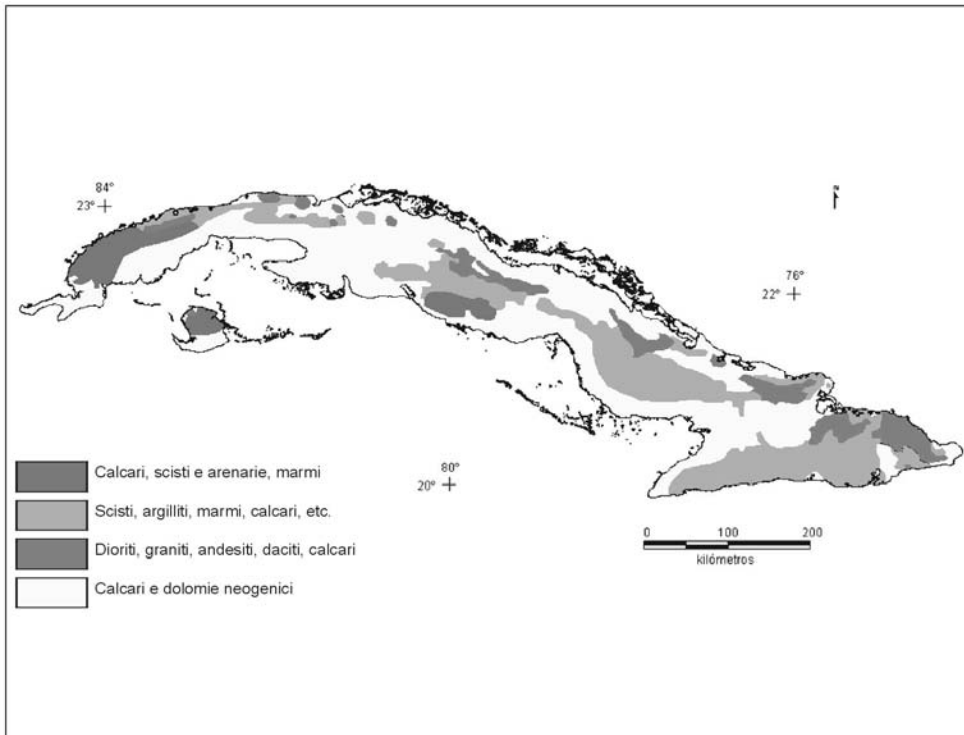


Fig. 1 - Carta schematica delle rocce carbonatiche di Cuba dell'intervallo Giurassico-Neogene (a opera di M. Iturralde Vinent).

Fig. 1 - Sketch map of Jurassic-Neogene carbonate rocks at Cuba (courtesy of M. Iturralde Vinent).

No	Campio ne	N	T	Baci no	pH	CO2	TSS	HCO3	Cl	SO4	Ca	Mg	Na+K	Tipo di acqua
1	RC-18	32	25.0	M-1	7.27	23.8	418	278.6	21.3	12.7	80.0	11.8	13.1	HCO3-Ca
2	RC-7	52	25.0	M-1	7.32	24.0	422	285.9	19.9	8.3	88.8	7.4	12.1	HCO3-Ca
3	RC-5	34	25.0	M-1	7.22	30.3	437	294.9	20.8	10.6	86.7	10.6	13.8	HCO3-Ca
4	RC-25	17	25.0	M-1	7.23	27.7	439	297.5	18.9	10.2	95.3	6.3	10.7	HCO3-Ca
5	RC-3	33	25.0	M-1	7.29	26.0	439	295.5	20.8	11.8	83.9	13.9	13.5	HCO3-Ca>Mg
6	RC-6	30	25.0	M-1	7.26	27.2	443	296.9	23.8	10.7	84.8	13.8	13.3	HCO3-Ca
7	RC-21	14	25.0	M-1	7.59	10.7	444	281.7	33.2	17.1	71.0	21.4	19.7	HCO3-Ca>Mg
8	RC-8	22	25.0	M-1	7.42	18.3	449	301.8	22.4	11.6	88.6	10.9	13.5	HCO3-Ca
9	RC-1	27	25.0	M-1	7.35	21.3	455	302.4	23.7	12.2	94.8	8.3	13.7	HCO3-Ca
10	RC-13	25	25.0	M-1	7.38	22.8	468	324.0	26.5	9.5	61.3	33.5	14.3	HCO3-Ca>Mg
11	RC-39	11	25.0	M-1	7.37	19.6	522	298.4	69.9	14.6	96.2	14.4	28.5	HCO3>Cl-Ca
12	RC-189	55	25.0	M-5	7.09	55.2	524	450.1	72.6	43.1	91.6	44.0	54.2	HCO3-Ca>Mg
13	RC-299	20	25.0	M-5	7.45	18.7	536	378.6	25.4	10.5	72.5	36.6	12.7	HCO3-Ca>Mg
14	RC-348	8	25.0	M-5	7.18	42.0	536	387.0	18.7	9.5	75.0	38.4	7.2	HCO3-Ca>Mg
15	RC-187	37	25.0	M-5	7.15	41.4	555	388.6	25.3	12.3	76.6	37.6	15.0	HCO3-Ca>Mg
16	RC-186	52	25.0	M-5	7.23	36.4	564	395.7	24.4	13.6	76.2	37.9	16.0	HCO3-Ca>Mg
17	RC-225	12	25.0	M-5	7.16	44.1	569	400.5	24.7	11.8	79.1	35.4	17.6	HCO3-Ca>Mg
18	RC-227	13	25.0	M-1	7.47	25.6	614	401.3	33.0	36.5	71.4	41.4	30.0	HCO3-Ca>Mg
19	RC-230	5	25.0	M-5	7.52	20.3	639	370.4	80.4	27.2	78.9	39.5	42.3	HCO3>Cl-Ca>Mg
20	RC-16	26	25.0	M-1	7.29	24.6	715	319.2	153.7	31.6	95.8	26.9	87.8	HCO3>Cl-Ca>Na>Mg
21	RC-23	18	25.0	M-1	7.46	14.7	723	305.3	168.2	37.7	67.5	33.4	110.5	HCO3>Cl-Na>Ca>Mg
22	RC-298	20	25.0	M-5	6.98	7.15	821	494.5	80.9	41.0	92.1	54.4	58.5	HCO3>Cl-Ca>Mg
23	RC-2	41	25.0	M-1	7.24	30.9	852	320.2	236.7	40.2	97.2	29.0	128.6	Cl>HCO3-Na>Ca
24	RC-26	18	25.0	M-1	7.31	24.3	875	337.9	225.5	56.0	68.4	42.4	147.3	Cl>HCO3-Na>Mg>Ca
25	RC-222	10	25.0	M-5	7.27	41.6	1483	463.9	711.4	75.6	115.7	72.1	403.4	Cl>HCO3-Na>Ca>Mg

Tab. 1 - Composizione chimica delle fonti di uso potabile dei Bacini Idrogeologici M-1 e M-5, appartenenti al Bacino Nord di Matanzas. Valori medi in mg/l.

Tab. 1 - Chemical composition of public waters in the catchments M-1 e M-5, belonging to the North Catchment at Matanzas. Average values in mg/l.

La figura 2 mostra in forma grafica la evoluzione, relativamente al totale dei minerali disciolti (TSS), dei caratteri idrogeochimici delle acque dei bacini idrogeologici M-1 e M-5 (Bacino Nord di Matanzas).

Dai risultati riportati in tabella 1 e in figura 2, si può stabilire la presenza di tre gruppi di acqua, sulla base della loro evoluzione chimica.

Il gruppo I comprende quelle acque che presentano nella loro composizione il più basso contenuto di magnesio. In esso si raggruppano le fonti per uso potabile: RC-18, RC-7, RC-5, RC-25, RC-8, RC-1, RC-39, RC-16, RC-23 y RC-2 (Bacino M-1). La litologia predominante in questa parte dell'acquifero è il calcare relativamente puro, mentre la facies originata dai processi di interazione acqua-roccia nella zona più lontana dal mare è di tipo bicarbonato-calcico (carattere idrogeochimico 181-181), con evoluzione per interazione con l'acqua di mare nella seguente maniera:

$HCO_3-Ca \rightarrow HCO_3>Cl-Ca>Na \rightarrow Cl>HCO_3-Ca>Na \rightarrow Cl>HCO_3-Na>Ca$.

Il gruppo II è costituito da acque che drenano calcari dolomitici, essendo le facies idrochimiche a minore salinità quelle bicarbonato-calcico-magnesiache dei caratteri 172-181 e 163-181. Le fonti d'acqua potabile in questo caso sono: RC-3, RC-6, RC-21, RC-13, RC-23 e RC-26 (Bacino M-1). Il percorso evolutivo diviene:

$HCO_3-Ca>Mg \rightarrow HCO_3>Cl-Ca>Mg>Na \rightarrow HCO_3>Cl-Ca>Na>Mg \rightarrow HCO_3>Cl-Ca>Na>Mg \rightarrow Cl>HCO_3-Na>Ca$.

Il gruppo III risulta formato da quelle acque che presentano il più alto contenuto di magnesio, a seguito della interazione con le dolomie. La facies idrochimica meno salina è di tipo bicarbonato-calcico-magnesiaca, con tipo idrogeochimico 154-281.

Le fonti d'acqua in questo caso sono: RC-189, RC-299, RC-187, RC-186, RC-225, RC-227, RC-230, RC-298 e RC-222 (Bacino M-5), e le sue acque seguono la evoluzione:

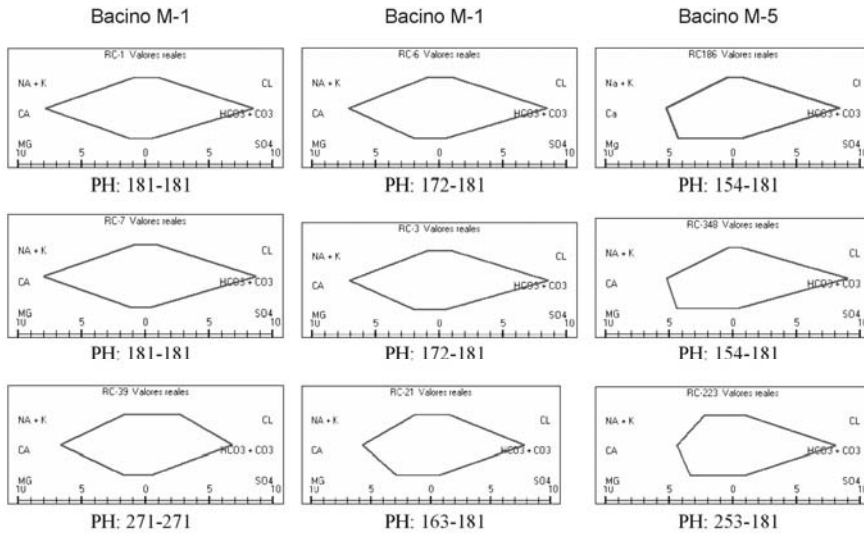


Fig. 2 - Andamenti idrogeochimici dei pozzi di acqua per uso potabile dei Bacini M-1 e M-5, Matanzas.
 Fig. 2 - Hydrogeochemical patterns of the public water wells in the catchments M-1 and M-5, Matanzas.

Processo geochimico	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Halite	29.8	23.4	21.6	25.7	23.9	29.8	25.2	45.7	31.0	21.6	32.8	31.6
Calcite	195.5	186.0	206.0	146.5	171.0	146.5	140.0	82.0	152.0	15.0	18.5	52.0
Dolomite	57.0	50.6	41.4	83.7	74.5	99.4	99.4	156.4	285.2	284.3	271.4	262.2
Pirite	7.5	5.1	6.3	8.1	6.6	6.6	7.2	10.8	8.4	6.0	6.6	7.5
Na-Ca (Ca ²⁺)	2.4	1.8	2.2	1.6	0.4	2.8	1.0	2.6	-44.8	5.4	4.4	-0.4
CO ₂	115.3	113.3	121.0	109.4	121.0	118.4	114.8	-11.4	109.4	167.4	142.6	173.4

Tab. 2a - Processi di interazione acqua di pioggia-roccia.

Tab. 2a - Interaction processes rainfall water - rock.

1) RC-1(m-1); 2) RC-7(M-1); 3) RC-25 (M-1); 4) RC-18; 5) RC-5; 6) RC-6 (M-1); 7) RC-3 (M-1); 8) RC-21 (M-1); 9) RC-186 (M-5); 10) RC-348 (M-5), 11) RC-299(M-5); 12) RC-225 (M-5).

Processo geochimico	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
% di miscela con acqua di mare	0.1	0.3	0.7	0.8	1.0	1.1	0.1	0.3	0.3	3.6
Calcite	-118.7	46.9	-5.7	-8.5	-132.8	-61.6	97.4	-5.6	23.0	12.7
Dolomite	107.8	37.5	90.5	132.1	174.4	66.4	1.3	-20.2	92.7	-74.2
Solfato	3.5	-0.8	4.2	6.8	14.8	3.8	18.1	6.8	15.2	6.1
Na-Ca (Ca ²⁺)	-0.8	9.3	-1.9	-14.5	-20.2	3.0	-29.4	-1.1	-14.8	-9.8
CO ₂	5.1	20.6	-5.0	-16.7	2.1	5.7	26.7	-30.4	22.3	48.2

Tab. 2b - Processi di interazione acqua di pioggia - roccia - acqua di mare.

Tab. 2b - Interaction processes rainfall water - rock - sea water.

13) RC-21 (M-1); 14) RC-39 (M-1); 15) RC-16 (M-1); 16) RC-23 (M1); 17) RC-26 (M-1); 18) RC-2 (M-1); 19) RC-223 (M-5); 20) RC-230 (M-5); 21) RC-298 (M-5); 22) RC-222 (M-5).

Tab. 2 a,b - Trasferimento di massa (mg/l) originato per dissoluzione o reazione chimica (+) o per precipitazione o consumo (-) nei processi geochimici che avvengono per interazione tra pioggia e roccia e per miscela con acqua di mare nei carbonati miocenici dei bacini M1 e M-5 di Matanzas.

Tab. 2 a,b- Mass transfer (mg/l) originated for dissolution or chemical reaction (+) or for precipitation or use (-) in the geochemical processes that occur due to the interaction between rainfall and rock and to mixing with sea water in the Miocene carbonates of the catchments M1 and M-5 at Matanzas.

$\text{HCO}_3\text{-Mg}>\text{Ca} \rightarrow \text{HCO}_3>\text{Cl-Ca}>\text{Mg} \rightarrow \text{HCO}_3>\text{Cl-Ca}>\text{Na}>\text{Mg} \rightarrow \text{Cl}>\text{HCO}_3\text{-Na}>\text{Ca}>\text{Mg}$.

L'origine della composizione chimica delle acque di uso potabile dei bacini M-1 e M-5 può essere spiegata mediante i processi geochimici illustrati in tabella 2.

I risultati riportati in tabella 2 e in figura 2 indicano che le fonti studiate nei bacini presentano buona qualità, solo alcune hanno una lieve intrusione marina (0,1–1,1% di miscela con acqua di mare, a eccezione di una fonte nel M-5, non utilizzata per il consumo umano, che raggiunge il 3,6% di miscelamento). Nelle acque la cui composizione si origina per processi di interazione acqua-roccia, i principali processi geochimici che si producono sono la dissoluzione di halite, calcite e dolomite. Nelle acque interessate da intrusione marina, invece, i principali processi geochimici sono la dissoluzione o la precipitazione di calcite e dolomite. In minor proporzione si produce anche ossidazione di pirite o riduzione dei solfati e interscambio ionico di tipo diretto (deficit di calcio e incremento di sodio) o inverso (incremento di calcio e deficit di sodio).

Calcari metamorfosati del Giurassico

Nella tabella 3 si presentano i risultati della caratterizzazione idrochimica delle acque minerali e potabili che drenano i depositi carbonatici metamorfici della Isla de la Juventud.

Come si apprezza dalla tabella 3, le acque minerali della Isla de la Juventud sono fondamentalmente di tipo bicarbonato-calcico (Santa Rita, Ojitos de Santa Lucía e Ferroso a la Fé), ma sono presenti anche facies di tipo bicarbonato-calcico-magnesiaco (Magnesiana de la Fé e El Rosario a Santa Bárbara) e bicarbonato-clorurato-calcico-sodiche (Magnesiana de Gerona); i loro contenuti medi di ioni disciolti variano tra 224 e 417 mg/l. I principali tipi idrogeochimici di queste acque sono: 181-181 e 172-181 (Leonarte e Fagun-

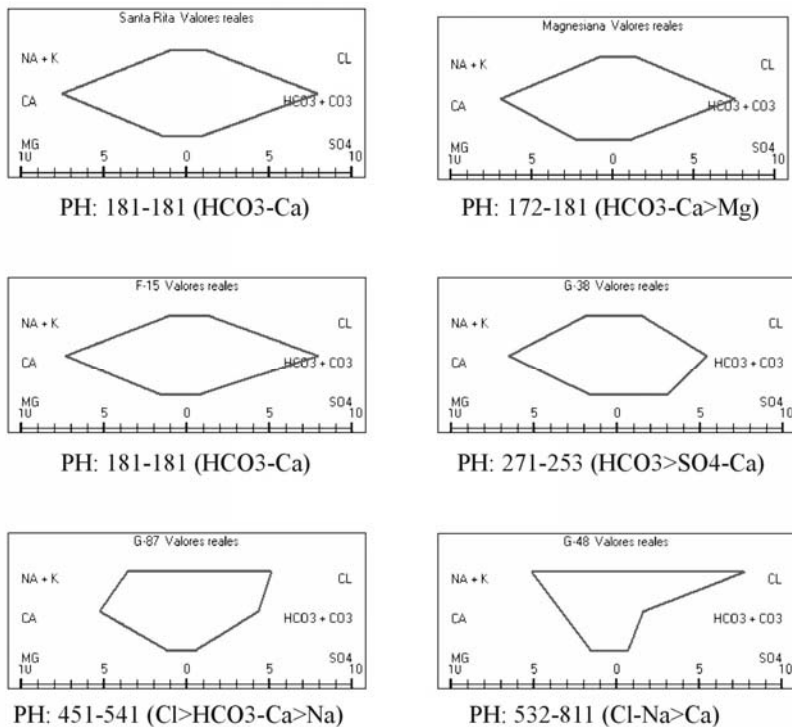


Fig. 3 - Andamenti idrogeochimici delle acque sotterranee che drenano scisti e marmi della Isla de la Juventud.
 Fig. 3 - Hydrogeochemical patterns of subterranean waters draining schists and marbles of the Isla de la Juventud.

N	Pozzo	N	T	pH	CO ₂	SiO ₂	TSS	HCO ₃	Cl	SO ₄	Ca	Mg	Na	K	Tipo di acqua
1	Rosario	1	39.4	7.00	16.9	13.5	224	134.6	22.0	11.4	34.2	8.6	13	0.6	HCO ₃ >Ca>Mg
2	Santa Rita	3	32.0	6.70	40.9	11.5	241	150.1	14.9	14.9	47.9	5.2	7.7	0.4	HCO ₃ -Ca
3	Ojitos SL	2	29.5	6.80	38.6	10.3	282	173.9	17.7	19.2	55.9	4.7	10.4	0.6	HCO ₃ -Ca
4	Ferroso	2	28.0	6.60	63.3	19.0	298	177.0	22.7	20.2	59.7	5.1	13.1	0.7	HCO ₃ -Ca
5	Magnes Fé	2	29.0	6.80	40.2	12.2	299	180.6	20.6	25.0	56.7	6.1	9.4	0.5	HCO ₃ >Ca>Mg
6	Magnes G	1	27.0	7.50	9.0	19.4	417	204.0	81.2	12.0	82.4	6.0	30.0	1.2	HCO ₃ >Cl>Ca>Na
7	F-15	38	25	7.05	26.2		185	118.8	12.1	8.3	35.2	4.9	6.1	0.0	HCO ₃ -Ca
8	F-94	68	25	7.05	23.3		198	124.4	15.0	8.5	36.9	4.6	8.9	0.0	HCO ₃ -Ca
9	F-25	98	25	6.82	50.6		235	148.1	16.3	11.3	45.3	5.3	8.0	0.8	HCO ₃ -Ca
10	F-85	54	25	6.98	29.9		255	160.0	17.4	12.9	51.2	4.1	9.6	0.2	HCO ₃ -Ca
11	F-52	55	25	7.09	36.6		265	157.8	26.7	11.4	48.2	5.3	15.3	0.3	HCO ₃ >Cl>Ca>Na
12	F-84	11	25	7.49	12.4		275	186.5	13.8	5.2	56.1	4.6	8.6	0.0	HCO ₃ -Ca
13	F-20	85	25	6.59	93.6		356	185.7	35.2	39.1	68.9	5.1	20.0	1.7	HCO ₃ >Cl>Ca>Na
14	F-86	25	25	6.98	40.0		365	211.5	37.5	19.6	65.2	7.5	23.5	0.5	HCO ₃ >Cl>Ca>Na
15	G-57	32	25	6.89	18.2		126	71.1	17.4	3.3	21.3	3.3	9.1	0.0	HCO ₃ >Cl>Ca>Na
16	G-28	49	25	6.97	31.7		239	141.8	29.3	4.7	43.4	5.7	13.7	0.3	HCO ₃ >Cl>Ca
17	G-77	56	25	7.26	17.0		241	159.5	16.4	5.6	40.2	8.5	10.5	0.0	HCO ₃ >Ca>Mg
18	G-38	75	25	7.03	29.7		286	131	22.0	57.0	51.4	7.5	17.0	0.0	HCO ₃ >SO ₄ -Ca
19	G-87	59	25	6.96	27.8		353	138.7	95.4	12.4	55.8	7.2	42.4	0.9	Cl>HCO ₃ >Ca>Na
20	G-63	30	25	6.99	34.4		394	148.2	111.8	14.5	52.5	10.9	55.8	1.7	Cl>HCO ₃ >Ca>Na
21	G-61	23	25	7.17	15.4		627	141.8	248.1	34.0	69.6	18.9	111.6	3.5	Cl>HCO ₃ >Na>Ca
22	G-48A	15	25	7.13	13.4		1061	170.0	478.1	57.0	116.7	31.8	201.0	6.2	Cl>Na>Ca

Tab. 3 - Composizione chimica delle acque minerali e di uso pubblico della Isla de la Juventud. Valori medi in mg/l. 1) M. Rosario (Santa Bárbara); 2- M. Santa Rita (La Fé); 3- M. Ojitos de Santa Lucia (La Fé); 4- M. Ferroso (La Fé); 5- M. Magnesiano (La Fé); 6- M. La Magnesiana (Gerona); 7-14: Fonti di uso pubblico del bacino idrogeologico La Fé; 15-22: Fonti di uso pubblico del bacino idrogeologico Gerona.

Tab. 3 - Chemical composition of mineral and public waters of Isla de la Juventud. Average values in mg/l. 1) M. Rosario (Santa Bárbara); 2- M. Santa Rita (La Fé); 3- M. Ojitos de Santa Lucia (La Fé); 4- M. Ferroso (La Fé); 5- M. Magnesiano (La Fé); 6- M. La Magnesiana (Gerona); 7-14: Public springs of hydrogeological basin of La Fé; 15-22: Public springs of hydrogeological basin of Gerona.

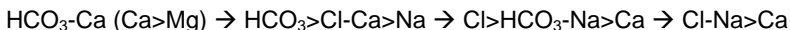
do, 2005; Leonarte, 2006).

Le acque di utilizzo pubblico del bacino idrogeologico La Fé sono principalmente di tipo bicarbonato-calcico, seguite da bicarbonato-clorurato- calcico-sodico e eccezionalmente da un campione di facies clorurato- bicarbonato-calcico-sodico, con contenuti di TSS medi che variano tra 132 e 286 mg/l. Queste acque devono la loro composizione al processo di interazione tra acqua -roccia, e la bassa mineralizzazione si spiega per la scarsa solubilità dei materiali acquiferi drenati (marmi e scisti). I principali caratteri idrogeochimici di queste acque sono: 181-181, 172-181, 271-181 e 271-271.

Nel bacino idrogeologico Gerona, la composizione chimica che acquisisce l'acqua sotterranea non è solo controllata dalla interazione acqua -roccia con simili materiali acquiferi, ma anche dai processi di intrusione marina attraverso il torrente Las Casa (Leonarte, 2006). Così si osservano facies a scarso contenuto di cloruro e di minerali disciolti (valori medi tra 126-241 mg/l), principalmente di tipo bicarbonato-calcico-magnesiaco, ma anche acque a maggiore mineralizzazione (valori medi tra 353-1061 mg/l), dei tipi HCO₃>Cl-Ca>Na e Cl-Na>Ca. I principali tipi idrogeochimici (Fig. 3) di queste acque a bassa mineralizzazione (126-286 mg/l) sono: 271-361 (acque bicarbonato-clorurato-calciche e calcico-sodiche), 271-361 (acque bicarbonato-calciche), 172-181 (acque bicarbonato-calcico-magnesiache); per quanto riguarda le acque di media e alta mineralizzazione (353-1061 mg/l) interessate da intrusione salina, i tipi idrogeochimici più tipici variano tra 271-361 nelle acque meno saline fino a 541-721 in quelle a maggior contenuto di cloruro di sodio.

In figura 3 si mostrano alcuni caratteri idrogeochimici tipici delle acque minero-medicinali di La Fé e delle acque di utilizzo pubblico dei bacini idrogeologici di La Fé e Gerona.

Dalle informazioni riportate in tabella 3 e in figura 3, si può ricavare che la tendenza evolutiva delle acque che drenano marmi e scisti della Isla de la Juventud è approssimativamente:



Il fatto che alcuni pozzi nel bacino idrogeologico di Gerona acquisiscono un grado relativamente alto di cloruro di sodio come conseguenza della intrusione salina deve essere oggetto di attenzione, tenendo in conto che questo fenomeno si presenta in qualunque tipo di acquifero costiero aperto e di isola oceanica (Post, 2005). Ciò è particolarmente grave in zone caratterizzate da scarsa precipitazione, ma è degno di attenzione anche in zone tropicali con pioggia elevata, nelle quali gli acquiferi sono sottoposti a uso intensivo.

Applicando il sistema informatico MODELAGUA (Fagundo-Sierra et al., 2001) ai dati idrochimici della Isla de la Juventud, sono stati determinati i processi geochimici che spiegano l'origine della composizione chimica di queste acque. I dati sono stati suddivisi in due gruppi, il primo costituito da acque la cui composizione è stata acquisita per il processo di interazione acqua-roccia (acque minerali e acque sotterranee potabili dei bacini idrogeologici La Fé e Gerona a basso contenuto di cloruro), e il secondo da acque che presentano un alto contenuto di cloruro, acquisito presumibilmente per la intrusione marina. I risultati dell'analisi sono presentati nelle tabelle 4a e 4b, rispettivamente.

Come si può notare nella tabella 4a, sia le acque minerali che quelle di uso pubblico, di mineralizzazione e contenuto in cloruro basso (Tabella 3), acquisiscono la composizione chimica principalmente mediante processo di dissoluzione di halite, calcite e dolomite, ossidazione di pirite e interscambio ionico diretto.

Le acque di uso pubblico interessate da intrusione marina nel bacino Gerona, con miscela con acqua marina tra 0.2 e 2.4% (Tabella 4b) acquisiscono la loro composizione a seguito dell'apporto ionico dell'acqua di mare, mediante processi geochimici di dissoluzione di cal-

Processo geochimico	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Halite	14.6	21.6	38.0	23.4	58.5	24.6	31.9	15.2	48.6	19.3	26.9
Calcite	88.0	109.5	93.5	78.5	131.0	87.0	63.0	68.5	145.0	31.5	100.5
Dolomite	32.4	23.4	38.7	73.8	73.8	55.8	27.0	28.8	32.4	18.9	50.4
Pirite	7.5	6.6	6.9	11.1	11.1	6.3	5.1	5.4	24.3	2.1	35.7
Na-Ca (Ca ²⁺)	3.1	3.6	2.4	6.5	6.5	6.5	2.9	1.9	2.4	3.4	-1.9
CO ₂	85.8	122.1	74.8	73.0	73.0	36.5	60.1	74.8	136.6	35.6	44.4

Tab. 4a - Processi di interazione acqua di pioggia-roccia
Tab. 4a - Interaction processes rainfall water - rock

Processo geochimico	12	13	14	15	16	17
% di miscela con acqua di mare	0.2	0.4	0.4	1.0	1.3	2.4
Calcite	46.0	11.9	125.7	9.9	-161.1	17.8
Dolomite	-9.8	-187.7	2.2	-13.6	-8.6	-14.5
Solfato	0.0	-30.6	-4.6	-1.0	-2.5	-1.6
Na-Ca (Ca ²⁺)	35.2	8.1	2.8	9.2	6.3	50.4
CO ₂	54.5	8.9	118.8	20.1	164.3	22.7

Tab. 4b - Processi di interazione acqua di pioggia-roccia-acqua di mare.
Tab. 4b - Interaction processes rainfall water -rock -sea water.

Tab. 4 a, b. - Trasferimento di massa (mg/l) originato da dissoluzione o reazione chimica (+) o da precipitazione o consumo (-) nei processi geochimici che avvengono mediante processi di interazione pioggia-roccia con carbonati metamorfosati del Giurassico. Fonti di acque minerali e di uso pubblico, Isla de la Juventud. Tab 4a: 1) M. Santa Rita (La Fé); 2) M. Hierro (La Fé); 3) M. Ojitos de Santa Lucía (La Fé); 4) M. Magnesio (La Fé); 5) M. Magnesio (Gerona); 6) M. Rosario (Santa Bárbara); 7) Pozzo F-15 (La Fé); 8) Pozzo F-94; 9) Pozzo F-20 (La Fé); 10) Pozzo G-57 (Gerona), 11) Pozzo G-38 (Gerona). Tab 4b: Pozzi del bacino idrogeologico Gerona: 12) G-50; 13) G-87; 14) G-34; 14) G-19; 16) G-13; 17) G-48 a. Acqua dolce: pozzo F-15; Acqua di mare: Playa Cajío.

Tab. 4 - Mass transfer (mg/l) originated for dissolution or chemical reaction (+) or for precipitation or use (-) in the geochemical processes that occur due to the interaction processes rainfall - rock with Jurassic carbonates of metamorphic origin. Mineral and public waters fountains, Isla de la Juventud. Tab 4a: 1) M. Santa Rita (La Fé); 2) M. Hierro (La Fé); 3) M. Ojitos de Santa Lucía (La Fé); 4) M. Magnesio (La Fé); 5) M. Magnesio (Gerona); 6) M. Rosario (Santa Bárbara); 7) Well F-15 (La Fé); 8) Well F-94; 9) Well F-20 (La Fé); 10) Well G-57 (Gerona), 11) Well G-38 (Gerona). Tab 4b: Wells of hydrogeological basin of Gerona: 12) G-50; 13) G-87; 14) G-34; 14) G-19; 16) G-13; 17) G-48 a. Acqua dolce: Well F-15; Acqua di mare: Playa Cajío.

cite, dolomitizzazione, riduzione anaerobica di solfato e interscambio ionico inverso.

Calcarei del massiccio cretaceo di Las Tunas

In generale, una parte delle acque sotterranee utilizzate per l'uso pubblico e agricolo nella provincia di Las Tunas presenta nella sua composizione un elevato contenuto di NaCl disciolto, il quale è acquisito durante la infiltrazione dell'acqua di pioggia attraverso la zona di alimentazione, specialmente nella zona del suolo. In esperimenti pedologici realizzati dall'Istituto de Suelos di questa provincia, le acque arrivano, in uno di questi suoli, fino all'8-0,7% di Cl- e 57,0% di Na+ nei primi 25 cm di profondità.

In tabella 5 si mostra la composizione chimica delle fonti selezionate per questo studio, che drenano carbonati cretacei nella provincia di Las Tunas. Tranne il pozzo P-195, di tipo bicarbonato-calcico e con basso TSS, i restanti campioni presentano, in generale, facies di tipo bicarbonato-clorurate e clorurato- bicarbonato-sodico-calcico-magnesiache.

Il pozzo P-195 presenta un andamento idrogeochimico tipico di calcare puro (172-181). I campioni restanti presentano caratteri di tipo; 532-471, 532-361 e 532-271 che riflettono l'alto contenuto di Cl- e Na+ (Fig. 4). Senza dubbio, se a questi campioni si elimina il contenuto di NaCl, si ottengono andamenti tipici di calcari dolomitici o misti tra calcari, dolomie e serpentiniti (145-181, 154-181, 163-181) o tra calcare e arenaria (352-181, 532-172).

Dalle analisi dei risultati di tabella 5 e figura 4, si può stabilire che la evoluzione della composizione chimica relativa delle acque che drenano carbonati sedimentari cretacei della provincia di Las Tunas, lungo la loro traiettoria sotterranea, segue principalmente la seguente sequenza:

a) Acque che interagiscono con calcari, calcari dolomitici e serpentiniti:

Cl-Na → HCO₃>Cl- Ca>Mg>Na → HCO₃>Cl-Na>Ca>Mg → HCO₃>Cl-Ca>Na>Mg → Cl>HCO₃-Na>Mg>Ca.

b) Acque che interagiscono con calcari, calcareniti e arenarie:

Cl-Na → HCO₃>Cl-Na>Ca.

In tabella 6 si presentano i risultati dell'analisi eseguita mediante un modello di bilancio di massa dei dati idrochimici corrispondente alle fonti di uso pubblico della provincia di Las Tunas. Come si può notare in tabella 6, i processi geochimici che maggiormente influiscono sulla composizione chimica delle acque studiate nella provincia Las Tunas sono dissoluzione di: calcite e dolomite in P-195 (campione 1), halite e dolomite (o serpentinite) nei campioni 2-6, e halite e plagioclasti nei campioni 7-8. Questi risultati concordano con quelli di tipo analitico (Tab. 5) e con i tipi idrogeochimici riscontrati (Fig. 4).

No	Pozzo	N	T	pH	CO ₂	TSS	HCO ₃	Cl	SO ₄	Ca	Mg	Na+K	Tipo di acqua
1	P-195	16	25.0	7.44	25.8	533	232.4	30.5	15.4	92.6	16.0	23.7	HCO ₃ -Ca
2	P-248	60	25.0	7.61	9.1	627	220.2	179.6	49.0	61.2	39	77.5	Cl>HCO ₃ -Na>Mg>Ca
3	Central Jobabo	23	25.0	7.90	23.0	1438	630.1	335.1	52.8	130.4	54.5	229.5	HCO ₃ >Cl-Na>Ca>Mg
4	Quinta Planta	17	25.0	7.83	17.1	1481	533.8	329.1	46.1	135.2	47.4	244.7	HCO ₃ >Cl-Na>Ca
5	Edificio Parque	10	25.0	7.80	19.1	1030	605.7	126.7	34.6	124.0	47.4	47.4	HCO ₃ >Cl-Ca>Na>Mg
6	La Siberia	12	25.0	7.82	27.4	1354	720.4	209.8	73.4	160.4	77.5	121.0	HCO ₃ >Cl-Ca>Mg>Na
7	Circunscrip. 7	11	25.0	7.73	27.7	1968	1008	200.6	214.6	143.8	53.3	346.7	HCO ₃ >Cl-Na>Ca
8	Cab. Colombia	13	25.0	7.54	52.3	1391	808.9	140.9	64.8	132.4	35.6	206.8	HCO ₃ >Cl-Na>Ca

Tab. 5 - Composizione chimica media in mg/l delle fonti selezionate nella provincia di Las Tunas.
Tab. 5 - Average chemical composition (in mg/l) of selected samples in the Las Tunas province.

Conclusioni

Negli acquiferi carsici sviluppatasi nei bacini interni (bacino La Fé nella Isla de la Juventud), i principali processi che spiegano la composizione chimica dell'acqua, di tipo bicarbonato-calcico o calcico-magnesiaca, sono: dissoluzione di calcite e dolomite, ossidazione di pirite e interscambio ionico.

Processo	1	2	3	4	5	6	7	8
Halite	42.0	282.5	565.5	555.0	207.5	207.5	334.3	231.8
Calcite	170.0	-168.0	122.5	127.6	107.5	107.5	52.5	168.0
Dolomite	116.8	335.8	412.2	357.9	357.9	357.9	403.0	267.7
Plagioclasti	0.0	0.0	0.0	395.7	137.5	137.5	2796.7	1489.6
Pirite	9.6	23.4	33.0	28.8	21.6	21.6	134.1	40.5
Ca-Na (Ca)	-12.0	53.0	-9.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Fc Cl	5.1	28.2	55.5	54.5	21.0	21.0	33.2	23.4

Tab. 6 - Trasferimento di massa (mg/l) originato da dissoluzione o reazione chimica (+) o da precipitazione o consumo (-) nei processi geochimici che avvengono mediante processi di interazione pioggia -roccia con carbonati del Giurassico di origine sedimentaria. fonti di uso pubblico della provincia di Las Tunas. Legenda campioni: 1) P-195; 2) P-248; 3) Central Jobabo; 4) Quinta Planta; 5) Edificio del Parque; 6) La Siberia; 7) Circunscripción 8; Cabecera Colombia.

Tab. 6 - Mass transfer (mg/l) originated for dissolution or chemical reaction (+) or for precipitation or use (-) in the geochemical processes that occur due to the interaction processes rainfall - rock with Jurassic carbonates of sedimentary origin. Public waters fountains, Las Tunas province. Legend sample: 1) P-195; 2) P-248; 3) Central Jobabo; 4) Quinta Planta; 5) Edificio del Parque; 6) La Siberia; 7) Circunscripción 8; Cabecera Colombia.

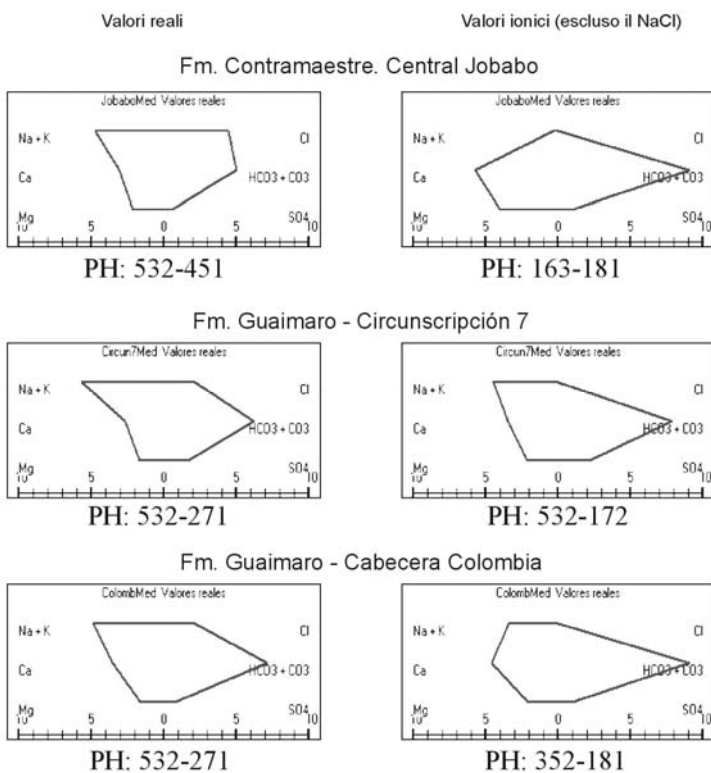


Fig. 4 - Andamenti idrogeochemici reali e ricavati (dai quali è stato eliminato il contenuto di NaCl) delle acque che drenano sedimenti carbonatici del Cretaceo con alto contenuto di cloruro di sodio nella provincia Las Tunas.

Fig. 4 - Real and obtained (with no NaCl content) hydrogeochemical patterns of the waters draining Cretaceous carbonate sediments showing high NaCl content in the Las Tunas province.

Nei bacini litorali (bacino Gerona nella Isla de la Juventud) le facies principali sono bicarbonato-clorurato-calcico-sodiche o sodico-calciche in funzione del grado di miscelamento dell'acqua dolce con quella di mare. Per quanto riguarda gli anioni, presentano la seguente evoluzione: $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ ($\text{Ca} > \text{Mg}$) \rightarrow $\text{HCO}_3\text{-Cl-Ca}$ $>$ Na \rightarrow $\text{Cl} >$ $\text{HCO}_3\text{-Na}$ $>$ Ca \rightarrow Cl-Na $>$ Ca . In direzione della costa le acque tendono a incrementare il contenuto di Cl^- , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Na^+ e TSS.

Negli acquiferi carsici litorali la composizione chimica dell'acqua si spiega mediante processi geochimici di dissoluzione o precipitazione di calcite e dolomite, dolomitizzazione, ossidazione di pirite, interscambio ionico diretto e inverso e riduzione anaerobica di solfato.

Le acque sotterranee che drenano carbonati dell'intervallo Neogene -Quaternario nel nord di Matanzas, costituiti da calcari e dolomie, in bacini che presentano contatto idraulico con il mare, possono essere suddivise in tre gruppi in base al contenuto relativo di calcio e magnesio. Le facies idrochimiche di queste acque seguono questo percorso evolutivo:

Gruppo I: $\text{HCO}_3\text{-Ca} \rightarrow \text{HCO}_3\text{>Cl-Ca}>\text{Na} \rightarrow \text{HCO}_3\text{>Cl-Ca}>\text{Na}>\text{Mg} \rightarrow \text{Cl}>\text{HCO}_3\text{-Ca}>\text{Na} \rightarrow \text{Cl}>\text{HCO}_3\text{-Na}>\text{Ca}$.

Gruppo II: $\text{HCO}_3\text{-Ca}>\text{Mg} \rightarrow \text{HCO}_3\text{>Cl-Ca}>\text{Mg}>\text{Na} \rightarrow \text{HCO}_3\text{>Cl-Ca}>\text{Na}>\text{Mg} \rightarrow \text{HCO}_3\text{>Cl-Ca}>\text{Na}>\text{Mg} \rightarrow \text{Cl}>\text{HCO}_3\text{-Na}>\text{Ca}$.

Gruppo III: $\text{HCO}_3\text{-Mg}>\text{Ca} \rightarrow \text{HCO}_3\text{>Cl-Ca}>\text{Mg} \rightarrow \text{HCO}_3\text{>Cl-Ca}>\text{Na}>\text{Mg} \rightarrow \text{Cl}>\text{HCO}_3\text{-Na}>\text{Ca}>\text{Mg}$.

Le acque studiate in questa regione presentano buona qualità, e i principali processi geochimici che ne originano la composizione sono: dissoluzione di halite, calcite e dolomite. In proporzione minore si produce anche ossidazione di pirite e interscambio ionico. Nelle acque che presentano lieve intrusione marina prevalgono i processi di dissoluzione o precipitazione di calcite e dolomite, accompagnati da ossidazione di pirite o riduzione anaerobica di solfato e da interscambi ionici diretti o inversi.

Le acque sotterranee che nella loro composizione presentano elevato contenuto di NaCl, poiché nel loro percorso acquisiscono una grande salinità durante l'infiltrazione nella zona di alimentazione dell'acquifero (Las Tunas), specialmente con suoli salini, sono caratterizzate da elevato contenuto di minerali disciolti e la loro composizione segue questi percorsi evolutivi: $\text{Cl-Na} \rightarrow \text{HCO}_3\text{>Cl-Ca}>\text{Mg}>\text{Na} \rightarrow \text{HCO}_3\text{>Cl-Na}>\text{Ca}>\text{Mg} \rightarrow \text{HCO}_3\text{>Cl-Ca}>\text{Na}>\text{Mg} \rightarrow \text{Cl}>\text{HCO}_3\text{-Na}>\text{Mg}>\text{Ca}$ (in presenza di calcari dolomitici o serpentiniti); $\text{Cl-Na} \rightarrow \text{HCO}_3\text{>Cl-Na}>\text{Ca}$ (in presenza di calcari, calcareniti e arenarie). Nella maniera mediante la quale quest'acqua acquisisce la propria composizione chimica, dominano i processi geochimici di dissoluzione di halite, calcite e dolomite (o serpentinite) e plagioclasti.

Bibliografia

- Academia de Ciencias de Cuba (1989) - Instituto de Geología y Paleontología, Mapa Geológico de Cuba. Scala 1:250.000.
- APHA -AWWA -WPCF (1992) - *Métodos Normalizados para el análisis de Aguas Potables y Aguas Residuales*. Am. Public Assoc., Edición 17th. Editorial Grijalbo, Madrid.
- Fagundo J.R. (1990) - *Evolución química y relaciones empíricas en aguas naturales*. I Estudio mediante simulación química del efecto de la litología. Voluntad Hidráulica, 82, pp. 28-37.
- Fagundo J.R. (1996) - *Química del Agua Kárstica*. In: Hidroquímica del Karst. Editori: J.R. Fagundo, J.J. Valdés, J.E. Rodríguez. Ediciones Osuna, Universidad de Granada (España), pp. 14-119.
- Fagundo J.R. (1998) - *Patrones hidrogeoquímicos y relaciones matemáticas en aguas naturales*. Ingeniería Hidráulica, vol. 19 (2), pp. 62-78.
- Fagundo J.R., González P., Suárez Muñoz M., Fagundo-Sierra J., Melián C., Alvarez E. (2005) - *HIDROGEOQUIM*. Contribución a la Educación y Protección Ambiental. ISCTN, vol. 6, pp. 58-67.
- Fagundo-Sierra, J., Fagundo J.R., González P., Suárez M. (2001) - *Modelación de las aguas naturales*. Memorias del VII. Taller de la Cátedra de Medio Ambiente, ISCTN, La Habana, vol. 2, 8 pp.
- Freeze, R.A., Cherry, J.A. (1980) - *Groundwater*. Ed. Prentice-Hall, Englewood, Cliffs, New York, pp. 604.
- Leonarte T., Fagundo J.R. (2005) - *Calidad de las aguas subterráneas de Gerona y la Fe*. XI Taller Cátedra de Medio Ambiente, ISCTN, vol. 6, pp. 45-58.

- Leonarte T. (2006) - *Calidad de las Aguas Subterráneas de Gerona y La Fé. Tesis de Maestría en Análisis y Tecnología Ambiental. Nueva Gerona, Isla de la Juventud.*
- Post V.E.A. (2005) - *Fresh and saline groundwarer interaction in coastal aquifers: Is our technology ready for the problems ahead?* Hydrogeology Journal, vol. 13 (1), pp. 120-123.