

INTENSIFICACION DE LA CORROSION QUIMICA POR LA ACTIVIDAD HUMANA EN LOS ACUIFEROS KARSTICOS DEL OCCIDENTE DE CUBA

J.R. Fagundo⁽¹⁾, D.M. Arellano⁽²⁾, P. González⁽¹⁾, V. Ferrera⁽¹⁾, G. Benítez⁽¹⁾, R. Furet⁽¹⁾.

⁽¹⁾ Centro Nacional de Investigaciones Científicas (CNIC)

⁽²⁾ Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH)

RESUMEN

Mediante el análisis de series cronológicas de más de 10 años se estudian los cambios de la mineralización, la composición química y el grado de agresividad respecto a la calcita en acuíferos cársicos litorales de las provincias de Pinar del Río, La Habana y Matanzas, sometidos a la explotación para el abasto a la población y el regadío. Se estima la corrosión química por efecto de la mezcla agua dulce-agua de mar. Se complementan los resultados de procesamiento de datos históricos, con experimentos de simulación en el laboratorio del proceso de disolución de las calizas.

Palabras clave: Hidrogeoquímica, acuíferos cársicos litorales, corrosión química.

ABSTRACT

The chemical composition and the calcite saturation index of the lithoral karstic aquifers at Pinar del Río, La Habana and Matanzas provinces, use water supply to the population and irrigation were studied by means of more than 10th years time series analysis. The chemical corrosion by effect of the mixed fresh-saline waters were evaluated. The above result obtained by historic data processing are compared with the results obtained by laboratory simulation of the limestone solution in mixing condition with sea water.

Key word: Hydrogeochemistry, lithoral karstic aquifers, chemical corrosion.

INTRODUCCION

Es conocido que cuando dos aguas con diferente mineralización y contenido de CO₂ disuelto se mezclan, se produce por efecto de fuerza iónica, una disminución de los coeficientes de actividad de los iones lo cual produce cambios en las constantes de los productos de solubilidad de la calcita (k_c) y la dolomita (k_d), y que para determinado grado de mezcla, se origina un incremento de la cantidad de roca disuelta en el acuífero. Este incremento de solubilidad es aún mayor, si una de las aguas que participa en la mezcla posee una elevada pCO₂. La acción del hombre en los terrenos carbonatados costeros puede producir, por sobreexplotación del acuífero, un deterioro de la calidad del agua (alto contenido de cloruros), y por vertimiento de residuales agroindustriales, altos contenidos de CO₂ (Fagundo et al, 1995).

Los fenómenos de corrosión, especialmente por mezcla de aguas son, por lo general, muy comunes en el caso, tanto en la zona no saturada como en la zona saturada. Las características propias de este medio, donde la circulación del agua ocurre a través de conductos más o menos independientes que tienden a integrarse, facilita la mezcla de diferentes aguas, las cuales aunque puedan encontrarse saturadas por separado, para determinadas proporciones de mezcla suelen hacerse de nuevo agresivas y seguir disolviendo rocas carbonatadas aún a grandes profundidades.

En los acuíferos carbonatados litorales, existe un equilibrio dinámico entre el agua dulce que drena al mar a través de los conductos cársicos y el agua marina que penetra en el acuífero por los mismos conductos, con mayor extensión

en los períodos secos, así como de mayor explotación del acuífero para el abasto a la población o la agricultura, ya que en estos casos la presión hidrostática se deprime y el agua de mar tiende a compensar este efecto. En los períodos lluviosos y de menor explotación la presión hidrostática es mayor y se limita la entrada del agua marina.

En la zona de mezcla agua dulce-agua de mar se ponen en contacto dos fases químico-físicas muy diferentes en cuanto a su composición química, mineralización, densidad, pH, temperatura y contenido de gases disueltos. En dependencia del grado de mezcla, la litología del acuífero y otras condiciones específicas, se producirán interacciones más o menos intensas y complejas, las cuales producen cambios en la permeabilidad de las rocas, así como en la geomorfología de la región.

Como resultado de la mezcla de agua procedente del medio subterráneo y del mar, en ocasiones se origina un agua de tipo agresiva que es capaz de disolver los carbonatos, ampliando los conductos cársicos. Se han reportado, por esta vía, incrementos de CaCO_3 hasta de 1 000 mg/L a 25 °C y una $p\text{CO}_2$ elevada (Trailkill, 1968).

En general, en un acuífero cársico costero se pueden distinguir tres zonas geoquímicas con las características siguientes:

- a) una zona donde prevalecen las aguas del tipo HCO_3^- - Ca^{2+} en equilibrio con la calcita.
- b) una zona en que prevalecen las aguas del tipo Cl^- - Na^+ , las cuales se encuentran sobresaturadas en relación con la calcita.
- c) una zona de mezcla o dispersión, donde las aguas son de los tipos $\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^-$ - $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+$, $\text{Cl}^- > \text{HCO}_3^-$ - $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+}$ o de facies intermedias, y las cuales se suelen encontrar insaturadas o saturadas respecto a la calcita.

De acuerdo con la información reportada en la literatura especializada en relación con la geoquímica de las aguas cársicas afectadas por la intrusión marina, en muchas regiones se han obtenido aguas con un determinado grado de saturación, aguas saturadas o aguas insaturadas respecto a la calcita o la dolomita (Custodio, 1986). Por ejemplo, Back y Hanshaw (1970) y Back et al, 1986) encontraron altos valores de sobresaturación en aguas de pozos en las penínsulas de Yucatán y Florida que atribuyeron a este tipo de mezcla de aguas. También estos investigadores (Hanshaw y Back, 1980) observaron que la mezcla de dos aguas saturadas en calcita da lugar a un agua insaturada. Un resultado similar ha sido reportado por Aguirre (1980) también en Yucatán.

Algunos especialistas (Plummer, 1975; Plummer et al, 1975) estudiaron el comportamiento de mezclas en distintas proporciones de agua dulce con agua de mar, demostrando que algunas de estas mezclas originaban aguas agresivas. Si bien ciertas proporciones pueden originar insaturación, otras por el contrario dan lugar a aguas sobresaturadas, especialmente cuando están presentes iones Mg^{2+} y SO_4^{2-} . Estos trabajos de simulación química sirven de base para explicar el intenso desarrollo de cavidades cársicas observado por algunos investigadores en terrenos carbonatados costeros (Cotecchia et al, 1975; Wigley et al, 1976; Hem, 1960).

En las zonas costeras europeas, especialmente en la península ibérica, se reportan también algunos trabajos recientes sobre los procesos de mezcla agua dulce-agua de mar en el carso (Herman et al, 1986; Pulido Bosch, 1989; 1991), donde se analiza además el efecto que ejercen en estos procesos la sobreexplotación de los acuíferos (Pulido Bosch, 1989; Calvache y Pulido Bosch, 1989; 1993; Custodio, 1989).

En las aguas procedentes de pozos de cuatro acuíferos cársicos desarrollados en el litoral de la región de Valencia, España, Morell y colaboradores (1986; 1988) encontraron que de un total de 38 muestras analizadas, sólo 13 estaban insaturadas respecto a la calcita. Además del mecanismo de disolución y precipitación de los carbonatos, estos investigadores estudiaron el papel que desempeñan los procesos microbiológicos de reducción de los sulfatos, el intercambio iónico y los compuestos minoritarios.

Los estudios con muestras tomadas por batimetría en el acuífero cársico litoral de la llanura meridional de Pinar del Río, demostraron que, por lo general, a medida que aumenta la profundidad del pozo, las aguas se van haciendo cada vez más saturadas hasta alcanzar un máximo, a partir del cual evolucionan hacia la insaturación o una menor saturación (Arellano, 1986; Arellano y Fagundo, 1985; Arellano et al, 1989).

Analizando series cronológicas de más de diez años, correspondientes a acuíferos cársicos litorales de Cuba sometidos a condiciones de sobreexplotación, se ha encontrado en ocasiones, tendencia a un incremento de la mineralización a pesar de mantenerse las aguas insaturadas en relación a la calcita. Algunos de estos procesos pueden hacerse irreversibles como consecuencia de una mayor permeabilidad en el acuífero debido a la disolución acelerada por vertimiento de residuales y efecto de fuerza iónica (Fagundo et al, 1991; 1993)

MATERIALES Y METODOS

Los datos hidroquímicos corresponden a pozos de la red de observaciones sistemáticas del Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH) en las provincias de Pinar del Río, La Habana y Matanzas. Los mismos fueron procesados mediante el sistema automatizado SAPHIQ (Alvarez et al, 1991), que permite, entre otras opciones, el cálculo de la relación de saturación de la calcita (RSC) y la dolomita (RSC); así como el análisis de la variación de la conductividad eléctrica, la dureza y los referidos índices de saturación en series cronológicas. También se utilizó el sistema BATOMET (Vinardell et al, 1995), con el objetivo de clasificar las aguas y determinar los diferentes patrones hidrogeoquímicos presentes.

La mezcla de agua de mar con agua dulce fue preparada en el laboratorio, mediante diferentes proporciones de agua de un pozo de la cuenca Jaruco-Aguacate (desarrollada también en calizas del Mioceno, pero no afectada por la intrusión marina) con agua del Océano Atlántico. Tal como se observa en la tabla 1, las mezclas fueron preparadas entre 0 y 10 %, en forma similar a la reportada para la caracterización del acuífero costero de Oropesa- Torreblanca (Morell et al, 1986).

Tabla 1. Concentración iónica, conductividad eléctrica, total de sólidos solubles (TSS) y raíz cuadrada de la fuerza iónica (μ) en una mezcla de agua dulce (cuenca Jaruco-Aguacate) y agua de mar (Océano Atlántico) en diferentes proporciones.

% agua de mar	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
iones estudiados											
HCO ₃ ⁻ (mg/L)	270	266	268	260	258	255	250	246	252	248	252
Cl ⁻ (mg/L)	17	200	389	568	761	938	1120	1314	1498	1680	1863
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	12	34	66	83	111	140	159	196	214	246	262
Ca ²⁺ (mg/L)	60	66	69	72	74	79	84	86	89	92	96
Mg ²⁺ (mg/L)	15	32	41	52	66	73	89	101	115	123	139
Na ⁺ (mg/L)	13	118	220	320	426	525	632	728	835	938	1042
K ⁺ (mg/L)	1	5	8	12	16	21	24	28	31	35	39
CE (μS/cm)	553	1230	1850	2596	3306	3850	4470	5080	5672	6270	6850
$\gamma_{Ca^{2+}}$	0.71	0.64	0.60	0.57	0.54	0.52	0.50	0.48	0.47	0.46	0.44
$\gamma_{HCO_3^-}$	0.92	0.89	0.87	0.86	0.85	0.84	0.83	0.82	0.81	0.81	0.80
TSS (mg/L)	388	721	1061	1367	1712	2031	2358	2699	3034	3362	3693
$\sqrt{\mu}$	0.08	0.12	0.14	0.16	0.18	0.20	0.21	0.23	0.24	0.25	0.27

RESULTADOS Y DISCUSION

Variación de la composición química y la relación de saturación de la calcita

Como puede apreciarse en la tabla 1, a medida que aumenta el porcentaje de agua de mar en la mezcla (agua dulce procedente del acuífero cársico no afectado por la intrusión marina, agua marina), se incrementa la concentración de iones, la mineralización (expresada como TSS o CE) y la fuerza iónica, mientras decrecen los coeficientes de actividad del calcio y el bicarbonato. De acuerdo con las leyes de la termodinámica, debe producirse un aumento de la disolución de la calcita para que se alcancen las nuevas condiciones de equilibrio químico:

$$k_c = \gamma_{Ca^{2+}} (Ca^{2+}) \gamma_{CO_3^{2-}} (CO_3^{2-})$$

En concordancia con este comportamiento químico-físico, en el acuífero litoral debe producirse un aumento de la corrosión química (disolución de calcita) con el incremento de la salinidad.

Los acuíferos tomados como ejemplo se encuentran desarrollados en calizas del Mioceno, en las provincias de Pinar del Río, La Habana y Matanzas. En la porción pinareña, los mismos están cubiertos por sedimentos alóctonos arcillo arenosos del Cuaternario y la zona de alimentación se encuentra en las regiones montañosas y pre montañosas, mientras que en las provincias de La Habana y Matanzas las calizas afloran en la superficie. En todos los casos la descarga es libre al mar y los acuíferos se encuentran afectados por la intrusión marina.

El primer ejemplo estudiado, corresponde al acueducto del poblado López Peña, ubicado en la llanura meridional de Pinar del Río (Fig. 1).

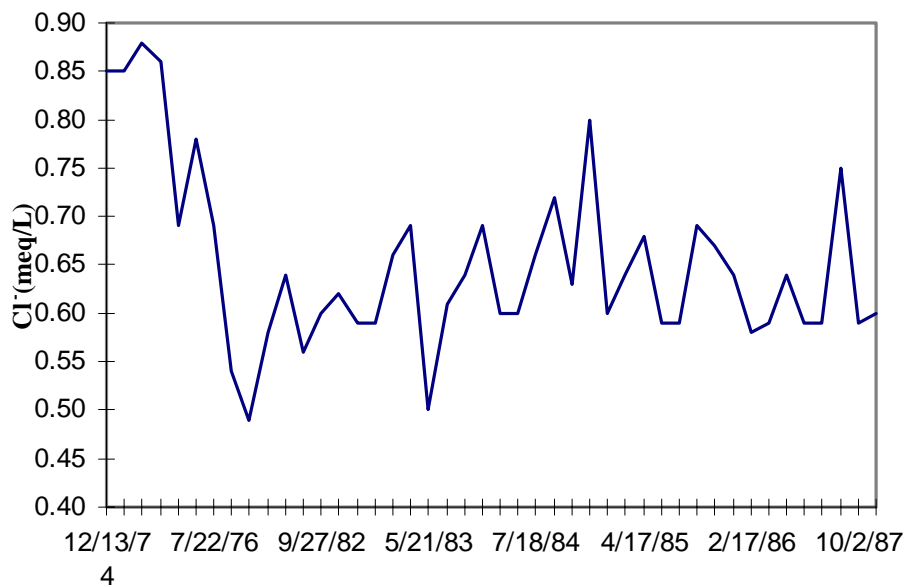


Figura 1. Variación temporal de la concentración de Cl⁻ en las aguas del acueducto López Peña, provincia de Pinar del Río.

En este caso, se observa que la concentración de ion Cl⁻ presenta una tendencia de tipo fluctuacional en el período comprendido entre el 13/12/1974 y el 17/3/1988, como consecuencia del régimen de lluvia y de alimentación del acuífero. Las aguas no han experimentado cambios apreciables en su composición química en este intervalo, a pesar de encontrarse con un relativamente alto contenido de salinidad. Estas aguas se han mantenido todo el tiempo como HCO₃⁻-Ca²⁺ (tabla 2), permaneciendo más tiempo insaturadas que sobresaturadas (Fig. 2).

Tabla 2. Composición química relativa (% de meq) de las aguas estudiadas en los provincias de Pinar del Río, La Habana y Matanzas

Muestra	Patron	No.	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺ +K ⁺
López Peña	3	45	81	14	5	76	13	11
Palacios	6	36	46	48	6	49	18	33
	7	14	39	57	4	46	18	36
Sur 158	3	20	81	15	4	77	9	14
Sur 165	3	2	74	22	4	69	13	18
	4	4	67	29	4	72	10	18
	5	11	60	36	4	67	10	23
	6	1	49	47	4	59	18	23
Pozo 226	2	12	87	10	3	47	47	6
Pozo 224	6	3	44	78	8	3	22	41
	7	8	37	56	7	29	20	51
Pozo 222	2	2	87	9	4	48	42	10
	7	3	37	58	5	27	21	52
	8	3	27	67	6	26	14	60
	9	5	20	74	6	14	20	66
	10	2	13	83	4	15	18	67

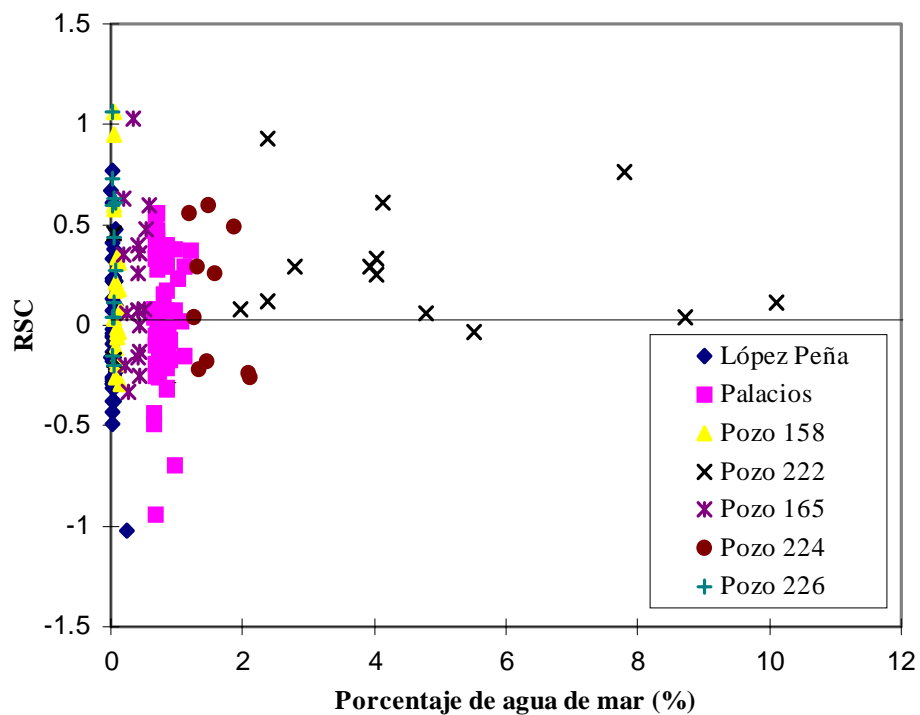


Figura 2. Variación de la relación de saturación de la calcita (RSC) con el porcentaje de mezcla con agua de mar.

El segundo ejemplo corresponde a la fuente de abasto del poblado Los Palacios, también ubicada en la llanura de meridional de Pinar del Río, pero sus aguas muestran una ligera salinización por intrusión marina. Obsérvese en este caso que la concentración de Cl^- (Fig. 3), a pesar de presentar una fluctuación estacional en el período 19/3/1976-17/3/1988, posee una tendencia ascendente en el tiempo. En este caso, las aguas suelen permanecer más tiempo insaturadas en ese mismo intervalo de tiempo (Fig. 2), y su composición presenta dos facies del tipo $\text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- \text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+$ (tabla 2).

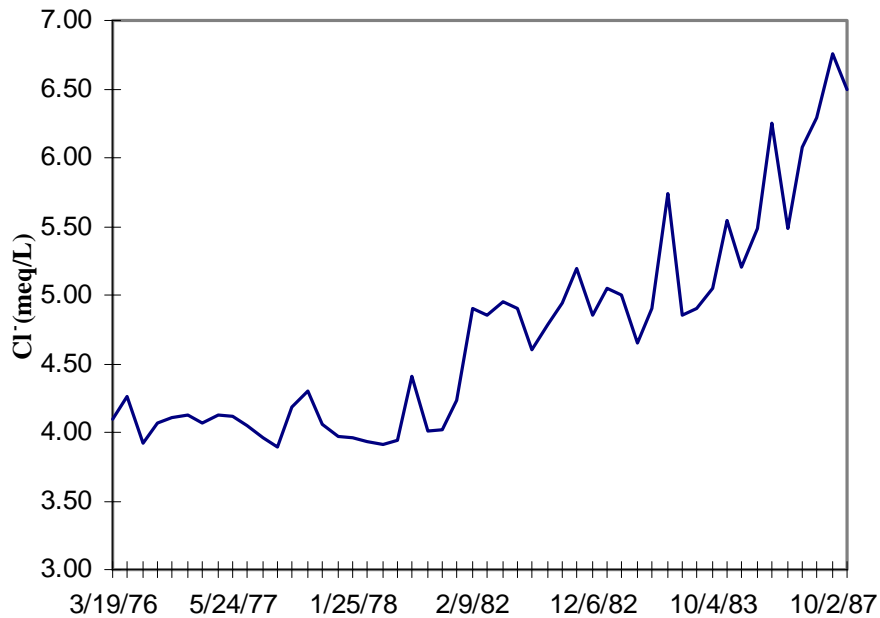


Figura 3. Variación temporal de la concentración de Cl^- en las aguas del acueducto Los Palacios, provincia de Pinar del Río.

El tercer pozo seleccionado (158) se encuentra ubicado en la cuenca Sur de La Habana. Sus aguas no muestran cambios apreciables en el tiempo, durante el período 19/3/1984-21/11/1986 en su contenido de Cl^- (Fig. 4) y composición relativa (tabla 2), aunque las mismas tienden a presentarse unas veces saturadas y otras insaturadas a la calcita (Fig. 2).

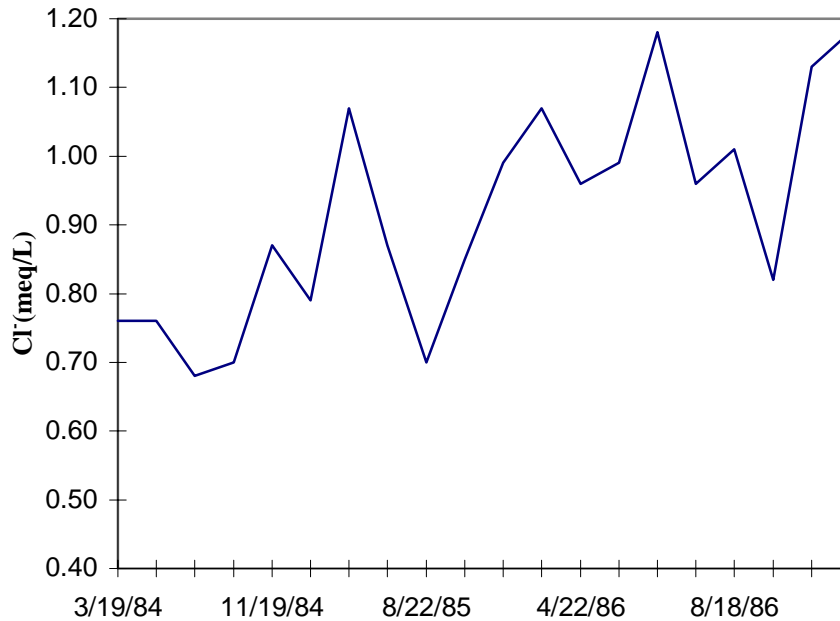


Figura 4. Variación temporal de la concentración de Cl⁻ en las aguas de una fuente de abasto (pozo 158), Cuenca Sur, provincia de La Habana.

El cuarto ejemplo corresponde también a un pozo de abasto (165) ubicado en la cuenca Sur de La Habana (Fig. 5). Sus aguas experimentaron un drástico incremento del contenido de Cl⁻ en el intervalo 23/1/1984-8/11/1987, como resultado de la sobreexplotación del acuífero, debido a que se creó un denso campo de pozos en esa área. En la mayoría de los casos, las aguas se presentaron saturadas o sobresaturadas a la calcita (Fig. 2), y variaron su composición de HCO₃⁻ Ca²⁺ a HCO₃⁻ > Cl⁻-Ca²⁺ > Na⁺ (tabla 2). Con posterioridad se tomaron medidas para disminuir la salinización en esta región, se desactivaron pozos y se creó un dique para tratar de contener la intrusión marina cuyos resultados se evalúan actualmente.

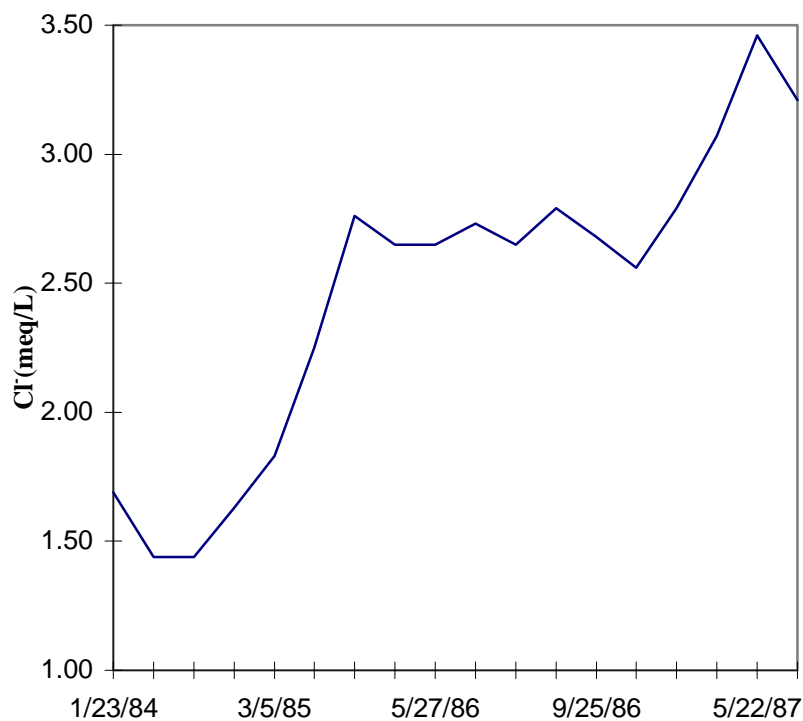


Figura 5. Variación temporal de la concentración de Cl⁻ en las aguas de una fuente de abasto (pozo 165) en la cuenca Sur, provincia de La Habana

El quinto pozo estudiado (226) se encuentra situado en la llanura septentrional que se extiende entre Cárdenas y Varadero en la provincia de Matanzas. Las aguas en este pozo, no experimentaron una apreciable variación en su contenido de Cl⁻ durante el intervalo 13/3/1984-11/9/1990 (Fig. 6) ni en su composición relativa, del tipo HCO₃⁻-Ca²⁺ > Mg²⁺ (tabla 2); por lo general, permanecieron sobresaturadas a la calcita (Fig. 2).

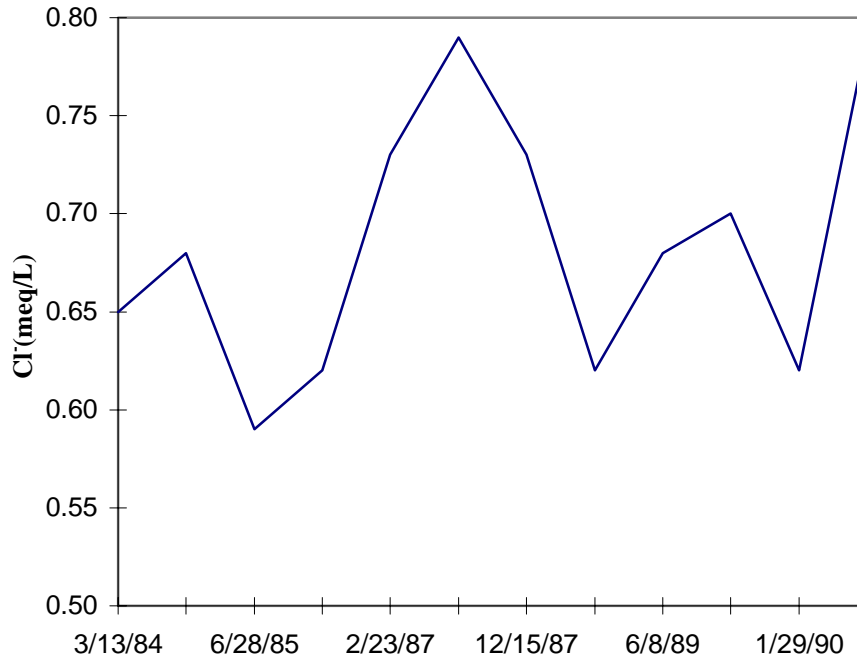


Figura 6. Variación temporal de la concentración de Cl⁻ en las aguas de una fuente de abasto (pozo 226) en el sector Varadero- Cárdenas, provincia de Matanzas.

Como ejemplo representativo de aguas ligeramente salinizadas de la provincia de Matanzas, se seleccionó otro pozo (224) del sector que se extiende entre Cárdenas y Varadero. Sus aguas, del tipo Cl⁻ > HCO₃⁻ - Na⁺ > Ca²⁺ > Mg²⁺ (tabla 2), presentaron una variación estacionar del contenido de cloruro en el período estudiado (18/3/1982-11/9/1990), tal como se aprecia en la figura 7 y permanecieron más tiempo sobresaturadas que insaturadas a la calcita (Fig. 2).

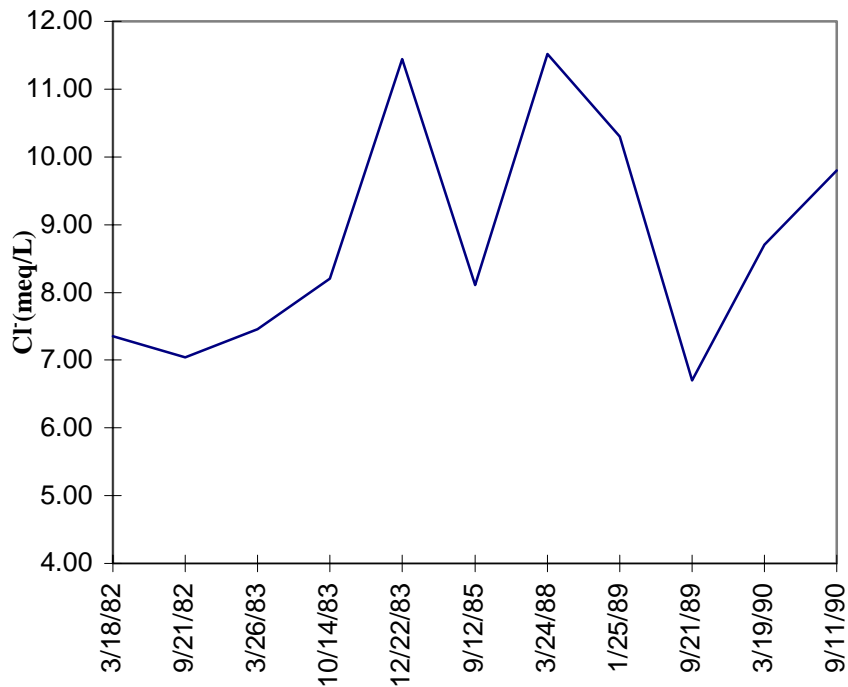


Figura 7. Variación temporal de la concentración de Cl⁻ en las aguas de una fuente de abasto (pozo 224) en el sector Varadero- Cárdenas, provincia de Matanzas.

El último ejemplo corresponde a las aguas de un pozo (222) ubicado cerca de un central azucarero que vertía sus residuales directamente al curso. El mismo se encuentra situado también en la misma región que los dos anteriores (224, 226). Las aguas del pozo 222 experimentaron un extraordinario incremento de su contenido de Cl⁻ en el período 3/2/1982-12/3/1990 (Fig. 8) y tendieron a encontrarse sobresaturadas a la calcita (Fig. 3). En este caso las aguas variaron su patrón hidrogeoquímico desde HCO₃⁻ - Ca²⁺ > Mg²⁺ hasta Cl⁻-Na⁺ (tabla 2).

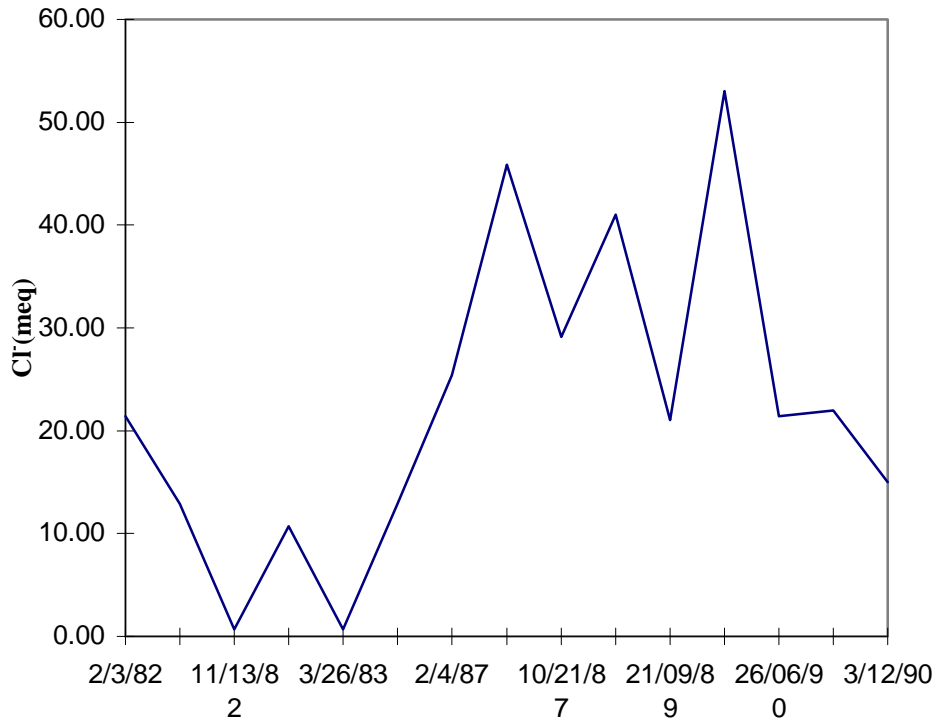


Figura 8. Variación temporal de la concentración de Cl⁻ en las aguas de una fuente de abasto (pozo 222) en el sector Varadero- Cárdenas, provincia de Matanzas.

Determinación de la corrosión química por efecto de la mezcla con agua de mar

A partir de los datos experimentales de la tabla 1, se puede calcular el porcentaje de mezcla (P_m) en un acuífero cársico litoral con similar litología a la de la cuenca Jaruco-Aguacate (condición que se cumple por los acuíferos estudiados en este trabajo), a partir de la concentración de Cl⁻ en la muestra (en meq/L) mediante la expresión:

$$P_m = 0,1912 (Cl^-) - 0,09 \quad (1)$$

donde el intercepto representa el contenido de Cl⁻ (en meq/L) a 0 por ciento de mezcla. Entonces, el contenido de Ca²⁺ aportado por la mezcla agua dulce-agua de mar ($(Ca^{2+})_m$) puede estimarse en función del porcentaje de mezcla, en forma gráfica o mediante mínimos cuadrados, según:

$$(Ca^{2+})_m = 0,2 P_m + 3,0 \quad (2)$$

Por tanto, la corrosión química en el acuífero, producida por el efecto de mezcla con el agua de mar, $(Ca^{2+})_{cq}$, puede expresarse en función de la concentración iónica de calcio calculada a partir de la diferencia entre el contenido iónico del calcio real $(Ca^{2+})_r$ y el calcio aportado por la mezcla:

$$(Ca^{2+})_{cq} = (Ca^{2+})_r - (Ca^{2+})_m \quad (3).$$

Sustituyendo en (3), (2) y (1),

$$(Ca^{2+})_{cq} = (Ca^{2+})_r - \{0,2 [0,1912 (Cl^-) - 0,09] + 3,0\} \quad (4)$$

El valor de $(Ca^{2+})_{cq}$ puede también expresarse en términos de dureza $(CaCO_3)_{cq}$ en mg/L, multiplicando el resultado por 50. Esta magnitud permite comparar cuanto mayor o menor puede ser la corrosión química en una cuenca en relación a otra.

Para la realización de los estimados anteriores, pueden tomarse al menos dos pozos representativos de cada acuífero, tal como los ejemplos seleccionados en las cuencas estudiadas en este trabajo.

En las tablas 3-6 se presentan los resultados de la estimación del porcentaje de mezcla y de la corrosión química de las diferentes muestras, en los acuíferos estudiados en las provincias de Pinar del Río, La Habana y Matanzas. En la parte izquierda de cada tabla aparecen los pozos que no sufrieron cambios apreciables en las magnitudes P_m y $CaCO_3$ cq (mg/L) en el período estudiado, mientras que en la parte derecha se presentan los pozos que sufrieron apreciables variaciones.

Tabla 3. Porcentaje de mezcla y magnitud de la corrosión química en el acuífero cársico litoral de la llanura meridional de Pinar del Río.

AÑO	López Peña			Palacios		
	No.	P_m	$CaCO_3$ cq (mg/L)	No.	P_m	$CaCO_3$ cq (mg/L)
1974	1	0.07	24			
1975	5	0.10	21			
1976	5	0.02	17	5	0.70	69
1977				11	0.69	53
1978				8	0.69	61
1979	1	0.03	40			
1980	1	0.01	47			
1982	3	0.03	41	9	0.85	71
1983	7	0.03	36	8	0.87	66
1984	7	0.04	33	2	1.04	57
1985	7	0.03	33	2	1.04	59
1986	4	0.03	41	2	1.02	86
1987	3	0.03	32	2	1.16	99
1988	1	0.03	28	2	1.16	90
Valor medio		0.04	32		0.81	66

Tabla 4. Porcentaje de mezcla y magnitud de la corrosión química en el acuífero cársico litoral de la cuenca Sur de La Habana.

AÑO	Pozo 158			Pozo 165		
	No.	P _m	CaCO ₃ cq (mg/L)	No.	P _m	CaCO ₃ cq (mg/L)
1984	6	0.06	78	4	0.21	67
1985	4	0.08	80	2	0.30	92
1986	10	0.11	88	9	0.43	85
1987				3	0.53	145
Valor medio		0.09	83		0.38	92

Tabla 5. Porcentaje de mezcla y magnitud de la corrosión química en el acuífero cársico litoral del sector Varadero-Cárdenas en la provincia de Matanzas

AÑO	Pozo 226			Pozo 224		
	No.	P _m	CaCO ₃ cq (mg/L)	No.	P _m	CaCO ₃ cq (mg/L)
1982				2	1.29	107
1983				3	1.64	60
1984	1	0.03	0			
1985	3	0.03	36	1	1.46	123
1986						
1987	3	0.05	54			
1988	1	0.03	42	1	2.11	44
1989	2	0.04	0	2	1.53	27
1990	2	0.04	12	2	1.68	104
Valor medio		0.04	28		1.59	74

Tabla 6. Porcentaje de mezcla y magnitud de la corrosión química determinado en el pozo 222, ubicado en el acuífero cársico litoral del sector Varadero-Cárdenas en la provincia de Matanzas.

Pozo 222			
AÑO	No.	P _m	CaCO ₃ cq (mg/L)
1982	4	2.10	106
1983	2	1.21	53
1984			
1985			
1986			
1987	3	6.34	133
1988	1	7.79	82
1989	1	3.95	118
1990	4	5.26	215
Valor medio		4.18	133

En general, la magnitud de CaCO₃ extraído de las rocas es diferente en las tres cuencas durante el período estudiado, apreciándose un incremento de la corrosión química en aquellos acuíferos que presentan un mayor porcentaje de mezcla de agua de mar (Fig.10).

Con el objetivo de estimar con más precisión el orden de la corrosión química básica extraída en cada cuenca, se seleccionó un grupo de muestras de baja salinización con igual porcentaje de mezcla (0,04-0,05 %), correspondientes a los pozos Lopez Peña, 158 y 226 respectivamente. Como puede apreciarse en la tabla 7, la cantidad de CaCO₃ extraída de la roca por estas aguas de baja salinidad, es similar en los acuíferos de Pinar del Río y Matanzas y más del doble superior en el acuífero de La Habana.

Tabla 7. Corrosión química básica en los acuíferos estudiados en las provincias de Pinar del Río, La Habana y Matanzas, para un porcentaje de mezcla del orden de 0,04-0,05 %.

	POZO	No.	CaCO ₃ cq (mg/L)
Pinar del Río	López Peña	15	30
Habana	158	7	69
Matanzas	226	7	30

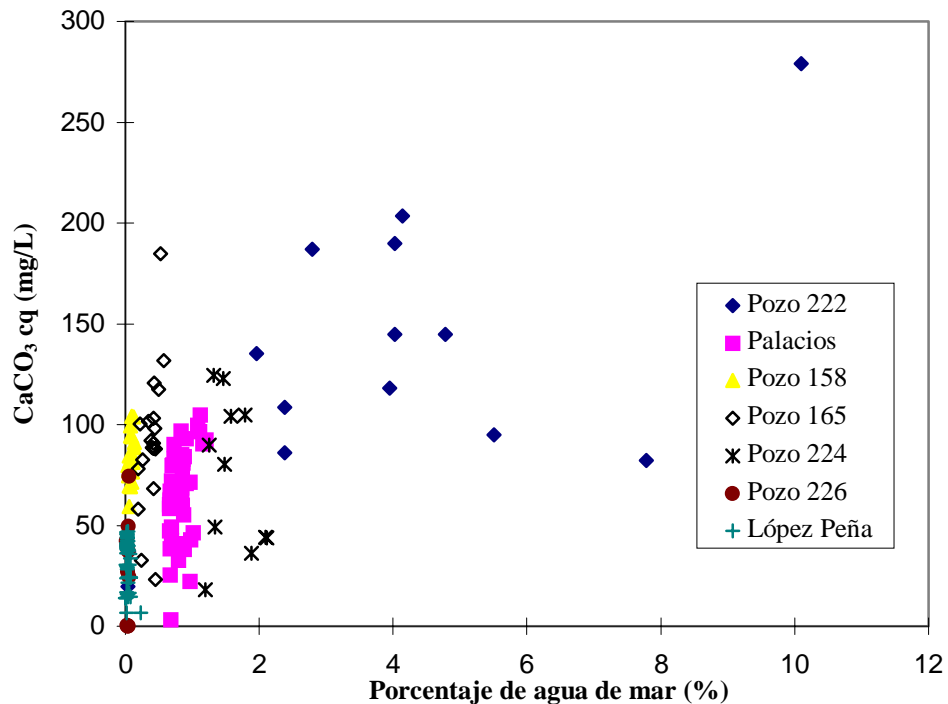


Figura 10. Variación de la corrosión química (en términos de CaCO₃) con el porcentaje de mezcla con agua de mar, en los acuíferos cársicos litorales del occidente de Cuba.

Los mayores valores de la magnitud (CaCO₃)_{cq} encontrados en el acuífero habanero en relación al de la provincia pinareña pueden deberse a que en el primero, la alimentación es directa a partir de las lluvias y la disolución de las calizas tiende a ocurrir en condiciones de sistema abierto respecto al CO₂. Los bajos valores encontrados en Pinar del Río pueden ser explicados por el carácter confinado del acuífero, donde la disolución de las calizas pueden tender a ocurrir en condiciones de sistema cerrado respecto al CO₂. Los bajos valores de corrosión química obtenidos en Matanzas, similares a los del acuífero pinareño, a pesar del carácter diferente de sus respectivas zonas de alimentación, pudiera estar relacionado con características de tipo litológicas (mayor proporción de dolomitas en el acuífero de Matanzas). La disolución de la dolomita a la temperatura media anual de las aguas en Cuba (25 °C) es inferior a la de las calizas puras.

Tal como se aprecia en la tabla 6, los máximos valores de (CaCO₃)_{cq} fueron detectados en el pozo 222, ubicado también en la zona matancera estudiada. En este caso influye de manera particular la alta disponibilidad de CO₂ por el vertimiento de residuales azucareros en el acuífero además del elevado porcentaje de mezcla de agua de mar.

Los resultados de los experimentos de laboratorio (tabla 8), son coherentes con los trabajos de campo, especialmente en el caso del pozo 222, donde el vertimiento de residuales biodegradables genera grandes cantidades de CO₂, lo cual acelera el proceso de corrosión química. Estos experimentos, realizados en condiciones de sistema abierto respecto al CO₂, muestran un apreciable aumento de la corrosión química a medida que aumenta el porcentaje de mezcla de agua de mar.

Tabla 8. Variación de la corrosión química con el porcentaje de mezcla con agua de mar, en un experimento de simulación química del proceso de interacción $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O-CaCO}_3$.

P_m	$\text{CaCO}_3_{\text{ca}}$ (mg/L)
0	0
2	144
6	269
10	344

Los resultados presentados en este trabajo llaman a la reflexión sobre los cambios que puede inducir la actividad del hombre, en la calidad de las aguas y en el incremento de la permeabilidad secundaria de los acuíferos cársicos litorales sometidos a una intensa explotación y donde, además, son vertidos residuales orgánicos.

Los cambios experimentados en la composición química de los pozos estudiados, en algunos casos en menos de diez años, son significativos y sugieren el desarrollo de estudios más amplios, donde se pueda establecer un cuidadoso balance de masas, con vistas a esclarecer la dinámica de estos acuíferos y medir los cambios producidos en la permeabilidad de las rocas. La acción simultánea del vertimiento de residuales orgánicos (capaces de generar elevados contenidos de CO_2), y de la sobreexplotación, especialmente en períodos secos en que aumenta la intrusión marina, puede dar lugar a un proceso de corrosión intensiva e irreversible, el cual puede facilitar la mayor penetración del agua marina en el acuífero, el empeoramiento de la calidad de las aguas subterráneas y la transformación del paisaje cársico.

CONCLUSIONES

A través de estudios de series cronológicas se pusieron de manifiesto cambios drásticos de la composición química y variaciones en la regularidad del grado de agresividad o saturación de las aguas; así como diferencias apreciables en la magnitud de la corrosión química, en acuíferos cársicos costeros desarrollados en calizas del Mioceno, en las provincias de Pinar del Río, La Habana y Matanzas, Cuba, sometidos a la explotación para el abasto a la población y al regadío y en ocasiones afectados por el vertimiento directo de residuales orgánicos. Estos cambios pueden hacerse irreversibles y originar una mayor permeabilidad de las rocas acuíferas.

Deben hacerse estudios más detallados con mayor número de datos, relacionando los resultados hidroquímicos con las variaciones de nivel piezométrico y el régimen de precipitación, con el fin de establecer la magnitud de estos cambios y tomar medidas para la preservación de la calidad de las aguas y las propiedades hidrodinámicas del acuífero.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo desean expresar su gratitud al Lic. R. Foyo, Director del Instituto de Oceanología por su ayuda en la colección de la muestra de agua oceánica, y en especial al Lic. Jaquín Gutiérrez del Centro de Investigaciones de los Recursos Hidráulicos por su participación personal en los análisis químicos.

BIBLIOGRAFIA

- Alvarez E. y J.R. Fagundo (1993). "SAPHIQ, un sistema para el procesamiento automatizado de datos hidroquímicos". Revista CENIC Ciencias Químicas 22 (1): 59-65.
- Aguirre L.V. (1980): "Aplicación de principios geoquímicos en la hidrología kárstica de la península de Yucatán", Ingeniería Hidráulica en México, 1(3): 21-29.

- Arellano D.M. (1986): "A study of karstic groundwater circulation using natural isotopes. Case history: Pinar del Rio Province, Cuba". Tesis de Dr. en Ciencias Geológicas, Univ. Carolina, Praga, pp. 178.
- Arellano D. M. y J.R. Fagundo (1985). "Criterio acerca de la zonación geoquímica de un acuífero cársico mediante índices químico físicos, parámetros hidroquímicos y relaciones iónicas". *Voluntad Hidráulica* No. 66, Año XXII, La Habana, pp 2-13.
- Arellano D.M., J.R. Fagundo, P. Jilek and J. Silar (1989). "Radiocarbon dating in a karstified coastal aquifer in Cuba". *Acta Universitatis Carolinae- Geologica*. Ed.: Univ. Karlova (Praga) 3: 367-387.
- Back, W. and B.B. Hanshaw (1970). "Comparison of chemical hydrology of the carbonate peninsulas of Florida and Yucatan". *Journal of Hydrology*, Vol. 10, No. 4, pp 330-368.
- Back W., B.B. Hanshaw, J.S. Herman and J.N. Van Driel (1986): "Differential dissolution of a Pleistocene reef in the ground-water mixing zone of coastal Yucatan, Mexico", *Geology*, 14: 137-140.
- Calvache M. L. y A. Pulido Bosch (1989): "Estado de la sobreexplotación estacional mediante un modelo de flujo en el acuífero del río Verde (Almuñecar, Granada)". En: *La Sobreexplotación de Acuíferos*. Ed. Inst. Tecnológico Geo Minero de España, Almería: 21-34.
- Calvache M.L. and A. Pulido Bosch (1993): "The influence on sea- water intrusion process of a karstic massif in a detrital system". In: *Some Spanish Karstic Aquifers*. E. Univ. de Granada, 127-142.
- Cotecchia et al. (1975). "Geochemica delle acqua sotterranee della Penisola Salentina in relazione al rapporto tra le acque di falda, le acque marine sotterranee e il mare". *Geologia Applicata e Idrogeologia*, Vol X, part 1, Bari: 205-224.
- Custodio E. (1986). "Hidroquímica del Karst". *Jornada sobre el karst en Euskadi*, Sn. Sebastian, España: 131-139.
- Custodio E. (1989). "Consideraciones sobre la sobreexplotación de acuíferos en España". En: *La Sobreexplotación de Acuíferos*. Ed.: Inst. Tecnológico Geo Minero de España, Almería: 43-64.
- Fagundo J.R. and D.M. Arellano (1991): "Hydrogeochemical impacts of coastal karst aquifer overdrafts". *Studia Carsologica (Brno)*, 5: 37-47.
- Fagundo J.R., D.M. Arellano, G. Benítez, A. Surí, C. Avilé, V. Ferrera y M. Torres (1993): "Cambios hidrogeoquímicos por sobreexplotación de acuíferos cársicos". *Libro de Comunicaciones. I Taller sobre Cuencas Experimentales en el Karst, Matanzas (Cuba) 1992*. Ed.: Univ. Jaume I, Castellón (España), 141-148.
- Fagundo J.R., J.J. Valdés y J.E. Rodríguez (1995). "Hidroquímica del Karst". Ed. Universidad de Granada. En prensa.
- Hanshaw B.B and W.Black (1980). "Chemical mass-wasting of the northern Yucatan, Peninsula by groundwater dissolution", *Geology*: 222-24
- Hem J.D. (1960): "Chemical equilibrium diagrams for ground water system", *Internat. Scientific. Hydrology Bull.*, 19: 45-53.
- Herman J.S., W. Back and L. Pomar (1986): "Speleogenesis in groundwater mixing zone. The coastal carbonate aquifers of Mallorca and Menorca, Spain", *9 th Congreso Internacional de Espeleología, Barcelona*, 1: 13-15.

- Morell I., J. Medina, A. Pulido Bosch y R. Fernandez Rubio (1986). "Caracterización de la intrusión marina en el acuífero costero de Oropesa-Torreblanca, provincia de Castellón, en base al estudio de relaciones iónicas". Hidrogeología 1: 15-31.
- Morell I., E. Gimenez y M.V. Esteller (1988). "Comportamiento iónico y procesos físico-químicos en acuíferos detríticos costeros de las Planas de Oropesa, Castellon y Granada" (Com. Valenciana). Hidrogeología 3: 21-33.
- Plummer L.N. (1975): "Mixing of seawater with CaCO₃ groundwaters", Geol. Soc. Am. Mem., 142: 219-236.
- Plummer L.N., D.L. Parkhurst and D.R. Kosiur (1975 b): "MIX2: A computer program for modeling chemical reactions in natural waters", Ed. U.S. Geol. Survey W.R.I. Rep. 75-61, pp. 68.
- Pulido Bosch A. (1989): "Caracterización Hidroquímica del campo de Dalías (Almería)", Ed. Inst. Andaluz de Reforma Agraria, España. pp. 265.
- Pulido Bosch A (1991): "Algunas reflexiones relativas a la sobreexplotación de acuíferos kársticos". Hidrogeología (Granada), 6: 47-58.
- Trailkill J. (1968): "Chemical and Hydrologic factors in excavations of Limestone Caves", Bull. Geol. Soc. Am., 79: 19.
- Vinardell I., E. Alvarez y J.R. Fagundo (1995). "Sistema automatizado para el control de las aguas cársicas afectadas por la intrusión marina mediante reconocimiento de patrones, BATOMET". En: "El Karst y los acuíferos Kársticos, ejemplos y métodos de estudio". Ed. A. Pulido-Bosch, J.R. Fagundo, J. Rodríguez, Univ. Granada (España), 251-256. Wigley T.M.L. and L.N. Plummer (1976): "Mixing of carbonate waters", Geochim. Cosmochim. Acta, 40: 489-995.