

NATURALEZA DE LOS PROCESOS DE DISOLUCION DE LOS MINERALES CALCITA, DOLOMITA Y YESO EN LAS AGUAS NATURALES DE LA REGION OCCIDENTAL DE CUBA

ING. J. R. FAGUNDO CSc — ING. J. PAJON — ING. J. VALDES CSc — ING. J. R. RODRIGUEZ — ING. M. ARELLANO CSc.

RESUMEN

Se presentan los resultados de las investigaciones hidroquímicas relacionadas con la evolución química y la disolución de los minerales calcita, dolomita y yeso, efectuados en la cuenca del río Cuyagua-teje, en la cordillera de los Organos; la sierra del Pan de Guaiaibón y otras áreas de la sierra del Rosario y la llanura meridional de Pinar del Río.

INTRODUCCION

El proceso de disolución de los minerales por las aguas naturales es complejo (Garrels y Christ, 1965); está controlado por un grupo de factores de índole químico-físico geológico, hidrológico, climático, antrópico, etc.

La solubilidad de un mineral depende principalmente de la temperatura del agua; pH; presión parcial de los gases disueltos; potencial redox y la concentración relativa de otros iones. Estos últimos, en el seno de la solución, pueden producir un incremento en la solubilidad de un mineral o su precipitación debido a los denominados «efecto salino» y «efecto de ión común», respectivamente.

En este trabajo nos referiremos básicamente a los procesos de interacción de las aguas naturales con los minerales de calcita, dolomita y yeso.

Principios químico-físicos

La solubilidad está relacionada con el pK , esto es, el logaritmo inverso de la constante de equilibrio K_i .

$$K_i = \frac{C^c \cdot D^d}{A^a \cdot B^b}$$

Las reacciones químicas correspondientes son en este caso



donde a y b son la cantidad de moles de las especies A y B , que reaccionan con c y d moles de las especies resultantes C y D , respectivamente.

Cuando la velocidad de ambas reacciones se iguala, para una temperatura dada, se establece el equilibrio.

A, B, C y D representan las actividades iónicas a_i , esto es, el producto de la concentración iónica c_i por el coeficiente de actividad γ_i .

$$a_i = \gamma_i \cdot c_i$$

Los valores de γ_i pueden calcularse a partir de la ecuación de Debye-Hückel

$$-\log \gamma_i = \frac{A \cdot Z_i^2 \cdot \sqrt{\mu}}{1 + a_i^\circ \cdot B \sqrt{\mu}}$$

donde A y B son parámetros que dependen de la temperatura; a_i° el diámetro eficaz de cada ion;

Z_i la valencia de cada ion y μ la fuerza iónica. Esta última se calcula a partir de la ecuación de Lewis y Randall;

$$\mu = \frac{1}{2} \sum Z_i^2 \cdot m_i$$

donde m_i son las concentraciones molales.

La relación entre la constante de equilibrio y la temperatura viene dada por la ecuación de Vant Hoff:

$$\frac{\partial \ln K_i}{\partial T} = \frac{\Delta H^\circ}{RT^2}$$

donde ΔH° es la entalpía de la reacción y R la constante de los gases ideales.

Mientras más bajo es el valor del pK , mayor por lo general, es la solubilidad. En algunos casos, donde en el proceso de disolución intervienen gases disueltos u otros factores, esto no se cumple, como sucede para la calcita y la dolomita, en que la solubilidad de este último mineral es mayor a pesar de que el pK de la dolomita es, aproximadamente, el doble que el de la calcita.

En la disolución de los minerales carbonatados influye en forma determinante el contenido de CO_2 . Las reacciones están reguladas por el sistema de equilibrios químicos $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O-Mineral}$.

Para la calcita y la dolomita este sistema puede expresarse según:



En el caso del yeso, el CO_2 no ejerce un efecto apreciable.

En un momento dado, cualquier agua natural puede encontrarse saturada, insaturada o sobresaturada respecto a un mineral. Para determinar su grado de saturación se han utilizado distintos índices basados en modelos químico-físicos. W. Back (1961), definió los siguientes:

$$\text{RSC} = \frac{[\text{Ca}^{2+}] [\text{CO}_3^{2-}]}{K_c}$$

$$\text{RSD} = \frac{[\text{Ca}^{2+}] [\text{Mg}^{2+}] [\text{CO}_3^{2-}]^2}{K_D}$$

$$\text{RSY} = \frac{[\text{Ca}^{2+}] [\text{SO}_4^{2-}]}{K_y}$$

Los iones encerrados entre corchetes representan las actividades iónicas de cada uno de ellos.

Aunque RSC, RSD y RSY representan los coeficientes de saturación respecto a la calcita, la dolomita y el yeso, respectivamente, con más frecuencia se utilizan los logaritmos de estos coeficientes, denominados relación de saturación de la calcita, la dolomita y el yeso:

$$\text{RSC} = \log \text{RSC (Relación de saturación de calcita)}$$

$$\text{RSD} = \log \text{RSD (Relación de saturación de dolomita)}$$

$$\text{RSY} = \log \text{RSY (Relación de saturación de yeso)}$$

Los valores de estos índices serán menor que cero, cero o mayor que cero según el agua insaturada, saturada o sobresaturada respecto al mineral de referencia. Para el cálculo de estos índices se han elaborado algoritmos formulados en distintas versiones (Jacobson y Langmuir, 1972; Garrel y Thompson, 1962; Kempe, 1975; Wolery, 1983; Fagundo y Valdés, 1975, 1986).

En el presente trabajo hemos considerado, principalmente, los procesos de interacción de las aguas naturales con los minerales calcita, dolomita y yeso.

Un aspecto importante que se debe tener en cuenta en los procesos de disolución de minerales carbonatados se relaciona con las condiciones en que ocurren las reacciones, esto es, si se da en condiciones cerradas o abiertas respecto al CO_2 .

En el primer caso, la disolución tiene lugar con un consumo progresivo del gas extraído de la zona del suelo. En el segundo caso, la fuente que sumi-

nistra el CO₂ no sufre cambios apreciables y la disolución ocurre en mayor extensión.

Por último, debe destacarse que la disolución de las calizas, calizas dolomitizadas, dolomías y yesos puede incrementarse como resultado de la mezcla de aguas con distinto grado de CO₂ y mineralización. Esto es especialmente ilustrativo en el caso de acuíferos cársticos afectados por la intrusión marina.

Aspecto geológico, geomorfológico e hidrológico.

Las regiones consideradas para el estudio de los procesos naturales de disolución y precipitación de los mencionados minerales comprende la cuenca del río Cuyaguatzeje; un perfil que se extiende desde el Pan de Guajaibón y Mil Cumbres hasta la sierra de la Güira, y un área de la llanura meridional de Pinar del Río.

En trabajos anteriores se reportan los resultados de la caracterización geoquímica, isotópica, hidrológica y geomatemática de estas áreas (Fagundo, Valdés, Pajón, y Rodríguez, 1981; Valdés J. y Fagundo J. R., 1981; Rodríguez, 1984; Pulina, Fagundo, Valdés y otros, 1984, 1986; De la Cruz y Valdés, 1985; Arellano y Fagundo, 1985; Arellano, 1986).

Esta extensa zona posee una geología compleja, la cual fue estudiada entre otros por Piotrowska, 1978; Pszczokowski, 1978; Maximov, 1978; Kalasnik, 1981.

El área montañosa se caracteriza por una gran complejidad litológica y estructural, donde muchas de las secuencias estratigráficas aparecen invertidas como consecuencia de procesos de cabalgamiento, debidos a desplazamiento diferencial y transporte tectónico de rocas, ocurrido en el Eoceno Medio. Forma parte de la denominada Zona Tectónico-Facial Guaniguanico (Pietrowska, 1978), compuesta por unidades nappe-escamadas que contienen formaciones que van desde el Jurásico Inferior hasta el Eoceno Inferior. Estas unidades constituyen los pisos estructurales inferiores. El piso superior postorogénico lo forman depósitos del Neógeno que afloran en la región de Guane.

En la cuenca del río Cuyaguatzeje ocurren tres unidades nappe-escamadas:

- La cadena de mogotes, construida por formaciones carbonatadas Jurásicas (formaciones Jagua y Guasasa), Cretácicas y del Paleógeno (formaciones Pons y Ancón, respectivamente); así como secuencias terrígeno-carbonatadas del Paleógeno (formación Pica Pica).

— Alturas de Pizarras del Norte,

— Alturas de Pizarras del Sur;

integradas por secuencias terrígenas de la formación San Cayetano que está constituida fundamentalmente por areniscas, esquistos arcillosos con intercalaciones de aleurolitas y calizas arenosas.

En los valles intramontanos existen además depósitos aluviales y lacustres de tipo terrígenos, formados durante el Cuaternario.

Los minerales asociados a los carbonatos son principalmente calcita y dolomina, mientras que en los depósitos terrígenos abundan esencialmente el cuarzo, la caolinita, la mica y otros minerales (Fagundo, Valdés y Pajón 1984).

En la región de la sierra del Rosario en que se realizaron los estudios hidroquímicos afloran depósitos de distintas edades y características litológicas. Según Maximov (1978), la complejidad geológica de esta región se debe a la presencia de rocas sedimentarias, efusivo-sedimentarias y terrígenas, diferentes por su litología; a la amplia manifestación de vulcanismo y magmatismo intrusivo; así como al intenso tectonismo. En esta región han sido descritas las siguientes formaciones:

— Sistema Jurásico. Constituido por las formaciones San Cayetano y Artemisa. La primera ya ha sido descrita. La formación Artemisa está integrada por calizas masivas o de estratos gruesos, con intercalaciones de aleurolitas y areniscas.

— Sistema Cretácico. Constituido por las formaciones Bahía Honda, Lucas, Guajaibón y Chiquita.

La formación Bahía Honda está representada por rocas efusivo-sedimentarias, más o menos fragmentadas y esquistos, donde aparecen diabasas, balsaltos, porfiritas y tobas.

Los estratos de la formación Lucas están formados por calizas laminadas de grano fino con intercalaciones de arenisca y aleurolitas.

La formación Guajaibón está constituida por calizas masivas (donde el mineral calcita se presenta muy puro), con intercalaciones de bauxitas. En las grietas se observa asfalto y petróleo líquido y, en algunas ocasiones, procesos de piritización.

La formación Chiquita está fundamentalmente constituida por conglomerados polimicticos, donde aparecen pedernales, aleurolitas, argilitas, areniscas, calizas, calizas arenosas y gravelitas.

— Sistema Paleógeno. Se encuentra constituido por la estructura de cubierta San Marcos. Comprende la zona de «melange» sedimentario y serpentinitico, con los bloques de las rocas de la formación San Cayetano, Artemisa y Lucas.

— Sistema Cuaternario. Representado por depósitos preluviales, deluviales y aluviales de constitución areno-arcillosa.

En la región de la llanura meridional ocurren secuencias calcáreas originadas durante el Neógeno, cubiertas por depósitos Cuaternarios de constitución arcillo-arenosa.

Desde el punto de vista geomorfológico, la región calcárea de la zona montañosa se caracteriza fundamentalmente por la presencia de distintos tipos de carso. En la sierra de los Organos predominan los denominados «mogotes» o carso cónico, mientras en la sierra del Rosario es más típico el carso de montaña, donde abundan las cuchillas y elevaciones escarpadas.

En la llanura meridional el carso se encuentra cubierto y afectado por la intrusión marina, en la medida que el acuífero es cercano a la línea costera.

La hidrología de estas áreas también es compleja. Desde el punto de vista hidrográfico en la cuenca del Cuyaguaje la red de drenaje superficial está controlada por la presencia de las dos unidades impermeables que forman las alturas de Pizarras del Norte y del Sur. Los ríos y arroyos que nacen en esas regiones interesan los macizos carbonatados y corren a través de los valles intramontanos hasta la desembocadura, en la península de Guanahacabibes. También existe un drenaje subterráneo, tanto de origen alóctono como autóctono.

La zona de alimentación es fundamentalmente a través de poljes, dolinas, uvalas, simas y otras formas de absorción. Además, a lo largo de la cuenca, existe una zona de pérdida donde disminuyen sensiblemente los gastos del río Cuyaguaje. Aguas abajo estos se vuelven a incrementar a expensas del aporte subterráneo.

En la sierra del Rosario las aguas de las precipitaciones se infiltran en los macizos carbonatados a través de dolinas, simas y poljes, originando un drenaje subterráneo que posee su zona de emisión en el contacto entre calizas y secuencias impermeables. Estas aguas alimentan las corrientes superficiales que corren aguas abajo. Parte de las aguas que se infiltran siguen un camino más profundo. En la zona de la falla Pinar parte de éstas

emergen con temperatura relativamente alta y elevado contenido de ion SO_4^{2-} . También existen en

la sierra del Rosario aguas artesianas de un origen similar que han sido descubiertas durante los trabajos de perforación.

En la zona de la llanura se presentan varios horizontes acuíferos con diferente grado de mineralización, como resultado de la intrusión marina en el acuífero cársico. Este efecto se ve incrementado en las áreas donde el regadío es más intensivo. Este acuífero se encuentra prácticamente confinado y drena hacia el mar. Por medio de técnicas isotópicas e hidroquímicas se ha evidenciado la conexión existente entre las aguas de la zona montañosa y premontañosa con el acuífero de la llanura (Arellano, 1986).

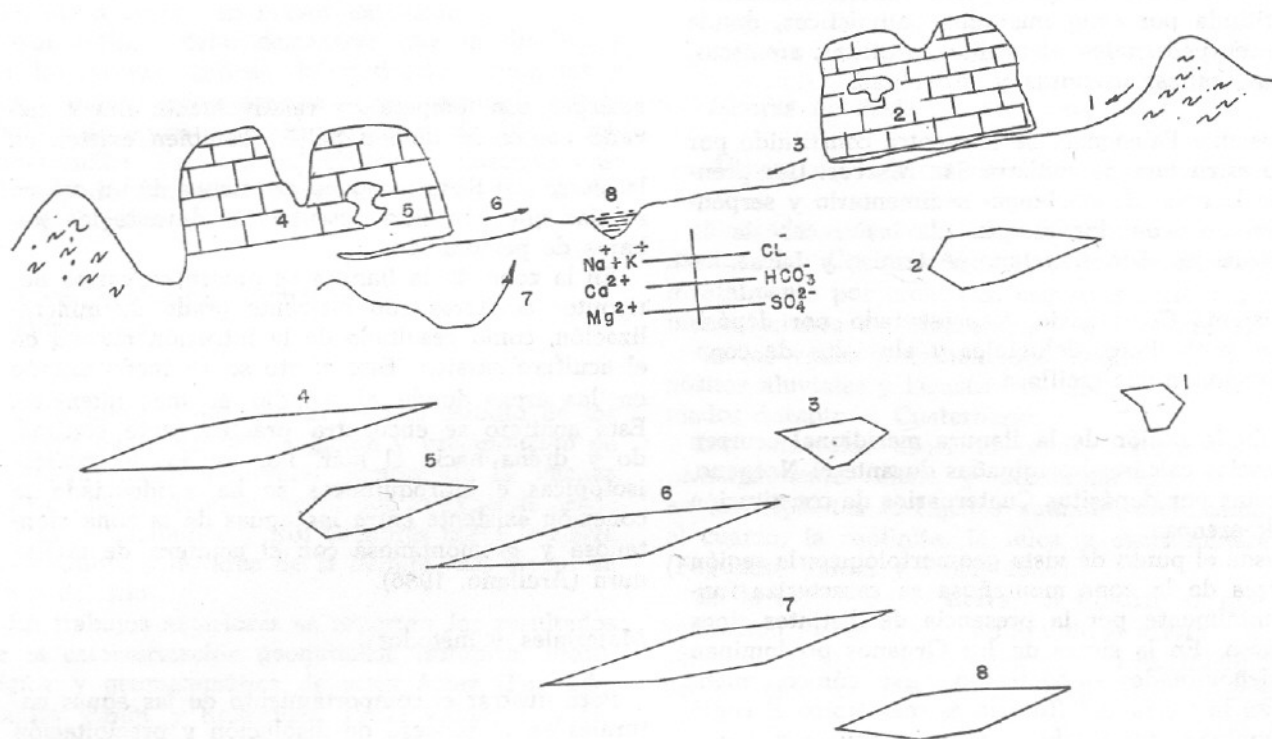
Materiales y métodos:

Para ilustrar el comportamiento de las aguas naturales en el proceso de disolución y precipitación de los minerales calcita, dolomita y yeso en la región Occidental de Cuba, se han tomado algunos resultados de las investigaciones hidroquímicas efectuadas en las áreas señaladas anteriormente. Los análisis químicos correspondientes fueron realizados mediante técnicas de campo (Markowicz y Pulina, 1979). Esta información fue procesada mediante el programa de computación AGMAR (Fagundo y Valdés, 1986), basado en un modelo químico-físico donde se considera la formación de especies acomplejadas y pares iónicos en la determinación de los índices de saturación de los minerales estudiados.

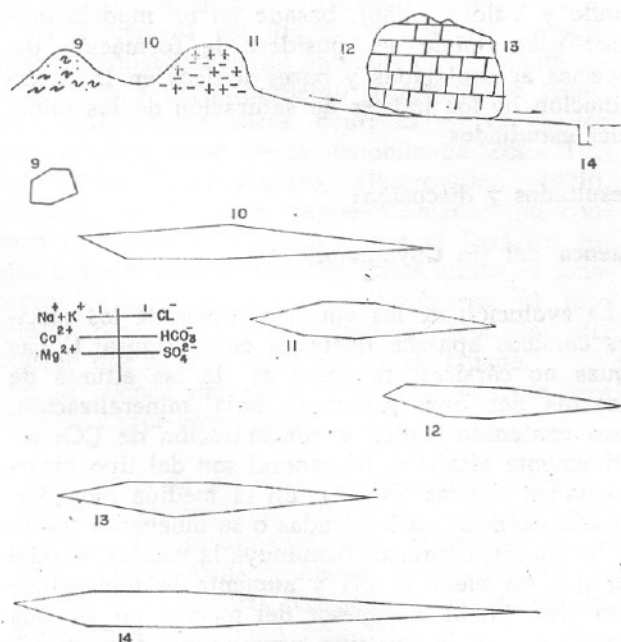
Resultados y discusión:

Cuenca del río Cuyaguaje

La evolución de las aguas a través de los macizos cársicos aparece ilustrada en la figura 1. Las aguas no cársicas, procedentes de las alturas de Pizarras del Sur, presentan baja mineralización, poco contenido iónico y concentración de CO_2 relativamente alta. Por lo general son del tipo bicarbonatadas sódicas (No. 1). En la medida que interesan secuencias carbonatadas o se mueven a través de los macizos cársicos disminuye la presión parcial del gas, se eleva el pH y aumenta la mineralización (No. 3). Si el espesor del macizo no es muy grande no cambia su tipo geoquímico de agua. Si este es grande se transforma en bicarbonatada cálcica. En todos los casos el grado de saturación respecto a la calcita, la dolomita y el yeso se hace menor. En el caso de recorridos transfluentes muy grandes llegan a sobresaturarse con respecto a los



1. Representación mediante diagrama de Stiff, de la evolución química de las aguas en la cuenca del río Cuyaguateje a lo largo del perfil que se extiende desde las alturas de Pizarras del Sur hasta los valles intramontanos.



dos primeros. La disolución de los minerales carbonatados ocurre, en este caso, en condiciones de sistema cerrado respecto al CO_2 , ya que durante el trayecto hipogeo no se reciben nuevos aportes de este gas.

En el sentido vertical, las aguas que captan los macizos carbonatados (No. 4) siguen la tendencia anterior hasta su emergencia por manantiales que se encuentran en la zona de saturación (No. 6 y 7). El contenido de CO_2 es muy bajo en las cavidades (No. 2 y 5), como resultado de la evaporación que se produce por un cambio brusco en la presión parcial del gas. En este proceso, parte del CaCO_3 disuelto pre-precipita en forma de estalactitas, estalagmitas y otras manifestaciones pavimentarias. Estos depósitos están, por lo general, constituidos de calcita, aunque en ocasiones pueden presentarse en forma de aragonito (Valdés y Fagundo, 1975). Estas aguas apenas sufren variación con respecto al yeso, como consecuencia de la poca abundancia del ion SO_4^{2-} o S^- en la litología local.

2. Representación mediante diagramas de Stiff, de la evolución química de las aguas de la cuenca del río Cuyaguateje a lo largo del perfil que se extiende desde las alturas de Pizarras del Norte hasta los valles intramontanos, pasando por las secuencias de la formación Pica Pica.

Todo el drenaje superficial y subterráneo de la parte alta y media de la cuenca se integra en el río Cuyaguatzeje, principal colector. Sus aguas se caracterizan por un contenido iónico relativamente alto (aunque menor que el de las aguas procedentes de las emergencias cársicas), un alto valor de pH y bajo contenido de CO_2 . Son del tipo bicarbonatadas cálcicas.

En la Fig. 2 se muestra la evolución química que sufren las aguas procedentes de las alturas de Pizarras del Norte, que interactúan con los macizos carbonatados Jurásicos y Cretácicos y con las secuencias terrígeno-carbonatadas de la formación Pica-Pica.

Los ríos superficiales que se originan en las elevaciones no cársicas son del tipo bicarbonatadas magnésico-cálcicas (No. 9) y sódico cálcicas, según la litología presente. Tienen baja mineralización y dureza y un alto grado de insaturación respecto a la calcita, la dolomita y el yeso.

Por el contrario, las aguas que se originan en las secuencias de la formación Pica-Pica, cuyas rocas se encuentran por lo general trituradas como consecuencia de los procesos tectónicos, muestran en su inicio (No. 10) un elevado contenido de CO_2 , altos valores de dureza y mineralización, son del tipo bicarbonatadas cálcicas y se encuentran sobresaturadas respecto a la calcita y la dolomita. En

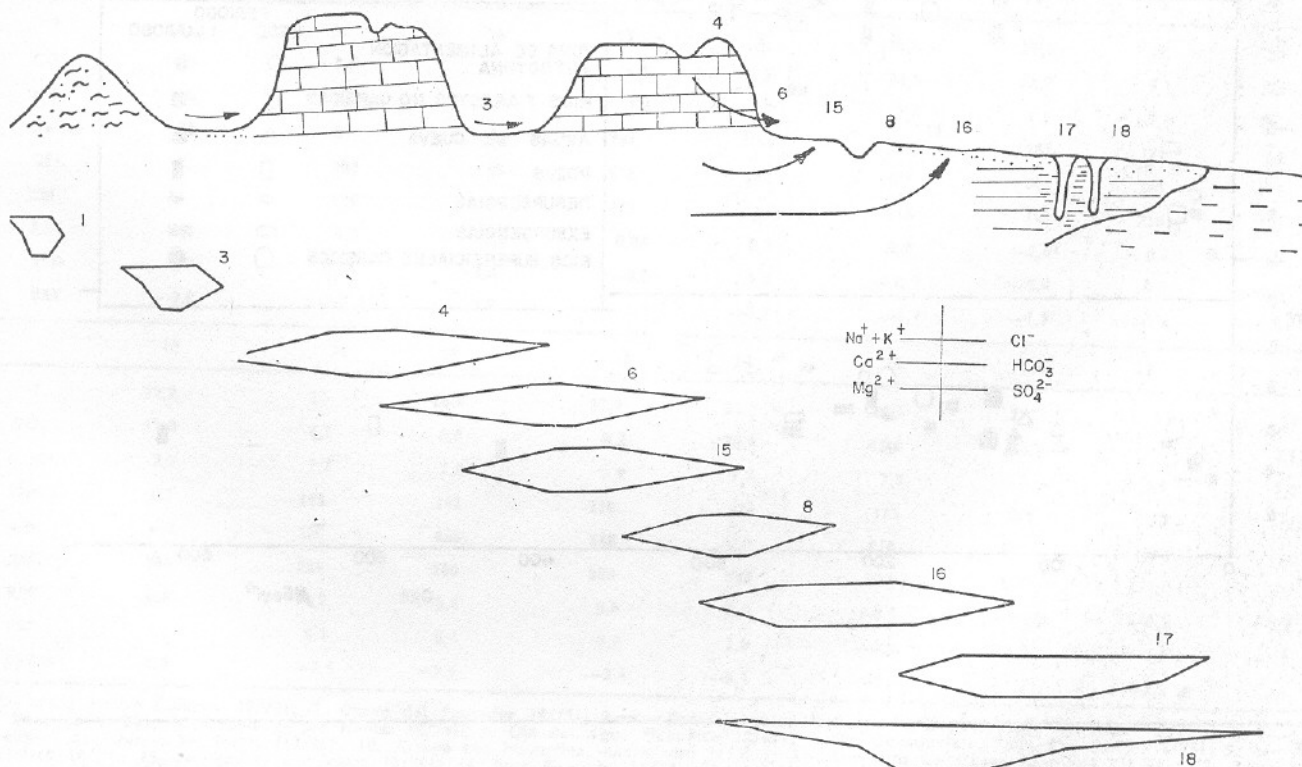
su recorrido subaéreo pierden parte del gas que se escapa a la atmósfera, precipitándose CaCO_3 en forma de travertina. En el interior de los macizos estas aguas se mezclan con las procedentes de las Pizarras haciéndose de nuevo agresivas. A pesar de que antes de interesar los paquetes Jurásicos estas aguas están saturadas respecto a los minerales carbonatados, al salir del macizo adquieren una mayor sobresaturación respecto a estos minerales. Con relación al yeso tampoco experimentan cambios apreciables.

Las aguas de esta región que se encuentran en la zona de saturación (No. 14) poseen elevados contenidos de CO_2 , dureza y conductividad. Se encuentran sobresaturadas respecto a la calcita y la dolomita y muy insaturadas respecto al yeso.

En la figura 3 se ilustra el comportamiento de las aguas en un perfil en dirección a la desembocadura. Como rasgo distintivo al visto anteriormente, deben destacarse las propiedades de las aguas procedentes de los acuíferos subterráneos que se encuentran en la porción media de la cuenca y en la desembocadura.

En el primer caso se encuentran las aguas que proceden de los pozos o manantiales ubicados en la región de los Portales (No. 16). Poseen una dureza y mineralización relativamente más alta que las procedentes de manantiales de la zona de satu-

3. Representación mediante diagramas de Stiff, de la evolución química de las aguas de la cuenca del río Cuyaguatzeje a lo largo del perfil que se extiende desde las alturas de Pizarras del Sur hasta la desembocadura.



ración (No. 15). Además, dichas aguas tienen una temperatura del orden de 27 °C y un elevado contenido de ion SO_4^{2-} , que sugiere un origen más

profundo; se ha considerado que estas aguas se mueven en la zona de saturación y circulación profunda (Rodríguez, 1984). No obstante, basado en la clasificación de Alekin (en Gutiérrez, 1982) son del tipo bicarbonatadas cálcicas.

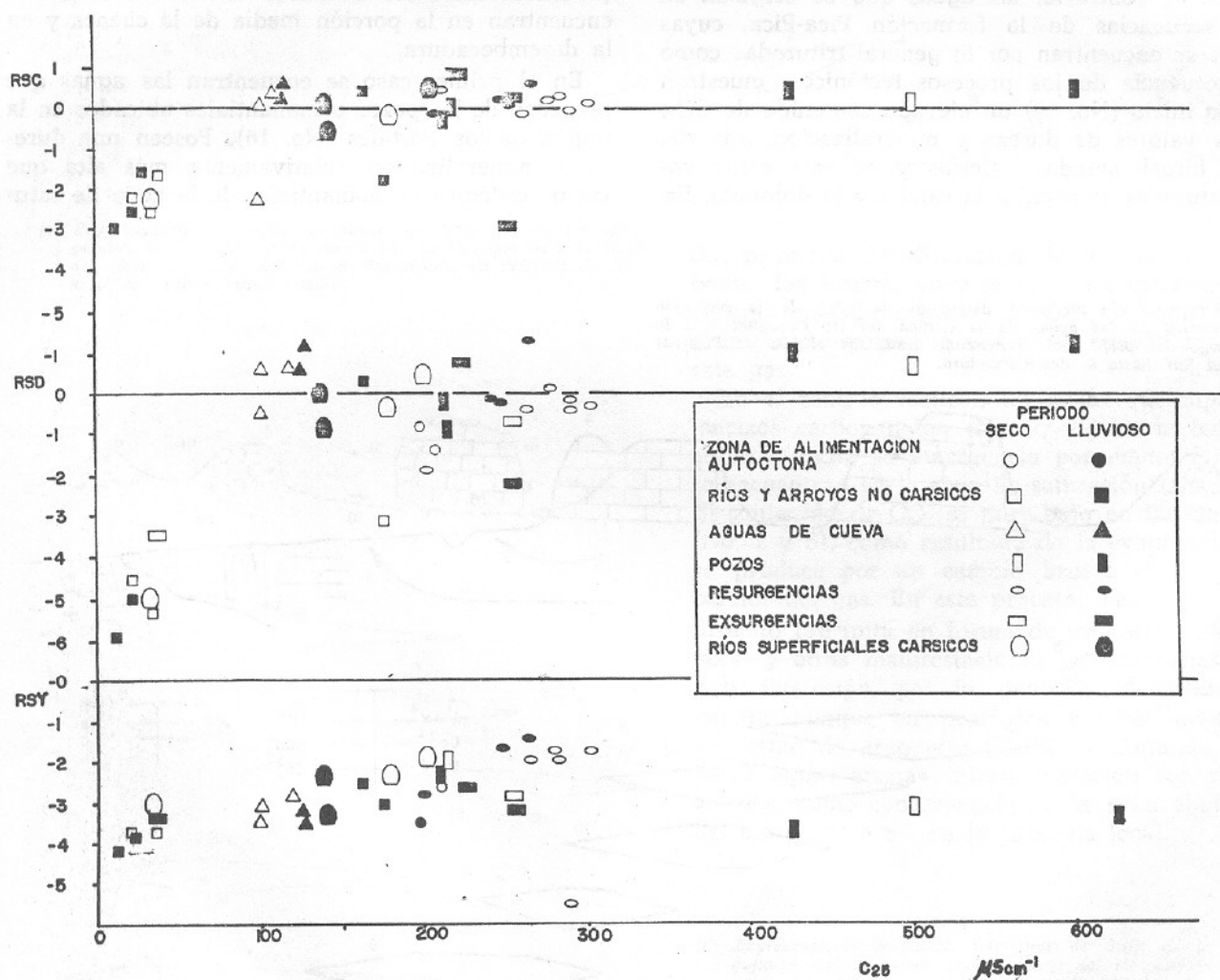
Tanto las aguas que proceden de la zona de saturación, como de la zona de saturación y circulación profunda, muestran poca variación estacional respecto a la temperatura; permanecen por lo general insaturadas respecto a la calcita, sobresaturadas respecto a la dolomita e insaturadas respec-

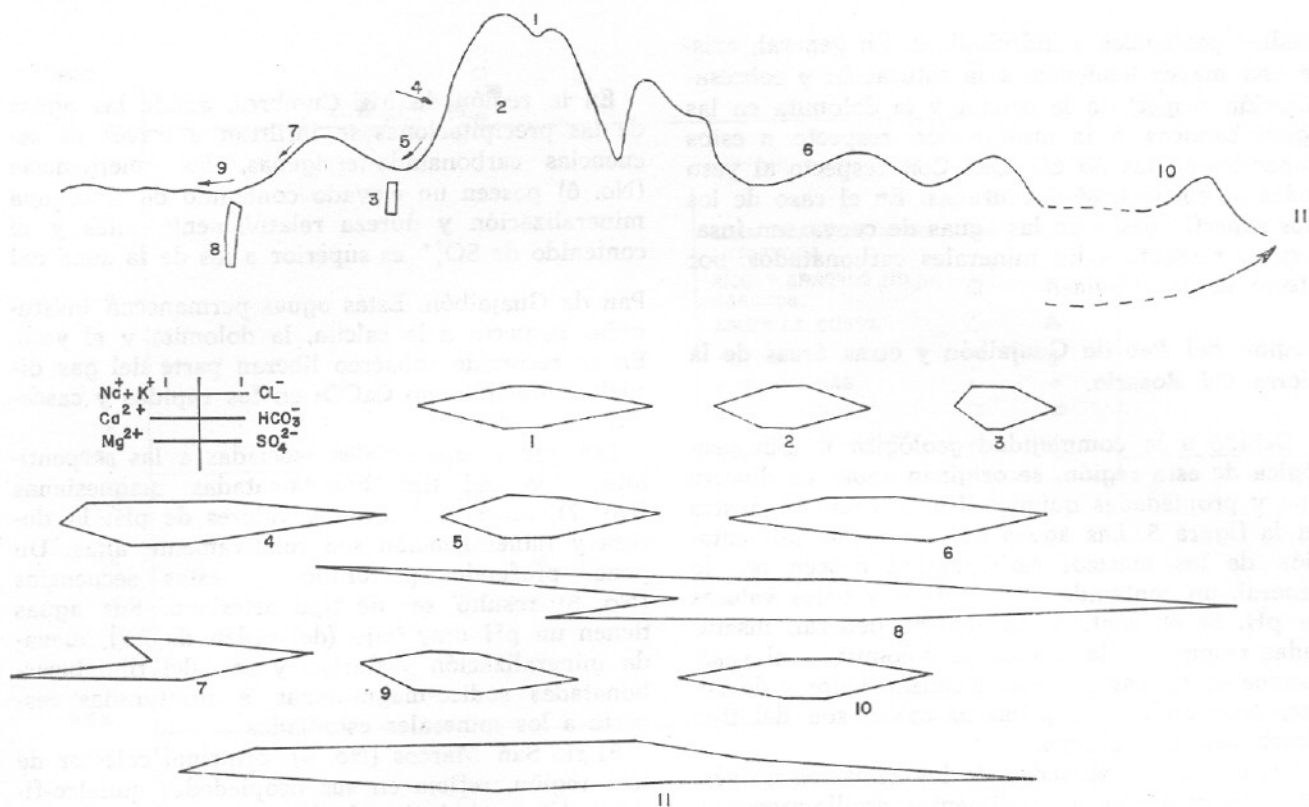
to al yeso. Con menor grado de insaturación se encuentran las de origen más profundo.

En la desembocadura, como ya se ha indicado, el acuífero subterráneo desarrollado en calizas Miocénicas (No 17 y 18), se encuentra confinado y parcialmente afectado por la intrusión marina. Como resultado del efecto salino estas aguas poseen una elevada mineralización y dureza, a pesar de encontrarse insaturadas respecto a la calcita, la dolomita y el yeso. Son del tipo bicarbonatadas sódico-cálcicas o cloruradas sódicas según el grado de mezcla.

En la figura 4 se muestra el estado de saturación de las aguas de la cuenca, en los distintos

4. Comportamiento químico-físico de las aguas de la cuenca del río Cuyaguaje con relación a los índices de saturación de la calcita (RSC), la dolomita (RSD) y el yeso (RSY).





5. Representación mediante diagramas de Stiff, de la evolución química de las aguas de la sierra del Rosario, a lo largo del perfil que se extiende desde la sierra de Cajalbana hasta la sierra de la Güira pasando por los macizos Pan de Guajaibón, Chiquita y Mil Cumbres.

Comportamiento químico-físico de las aguas de la cuenca del río Cuyaguatzeje

Tabla 1.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
T	28,6	22	26	23,6	22	25,5	25,6	28	20
CO ₂	16,9	1,8	7,9	19,2	1,3	14,4	17,9	9,1	2,2
pH	6,6	8,1	7,1	7,3	8,2	7,4	7,3	7,8	7,6
CaCO ₃	23	89	30	208	114	234	257	139	63
CE ₂₅	83	208	107	518	243	510	586	346	193
ΣM	51	129	66	321	151	316	363	215	120
RSC	-2,5	0,2	-1,5	0,04	0,4	0,2	-0,01	0,3	-1,3
RSD	-5,0	0,06	-3,5	-0,5	0,7	-0,3	-0,4	0,2	-2,3
RSY	-3,8	-3,4	-3,7	-2,1	-3,2	-1,9	-1,9	-2,3	-4,8
	10	11	12	13	14	15	16	17	18
T	22,2	22	26,8	27,2	26,7	24,6	27	26	27
CO ₂	12,0	6,0	6,4	5,2	36,0	15,8	13,3	7,7	14,6
pH	7,7	7,7	7,8	7,9	7,3	7,3	7,4	7,5	7,2
CaCO ₃	327	184	162	218	424	173	252	210	213
CE ₂₅	617	380	420	565	939	414	504	1082	918
ΣM	383	236	260	350	582	257	312	671	569
RSC	0,6	0,2	0,4	0,8	0,5	-0,1	-0,03	-0,1	-0,2
RSD	1,2	0,1	0,4	0,8	1,0	-0,8	-0,2	-0,2	-1,0
RSY	-3,9	-2,6	-2,5	-2,6	-5,6	-2,5	-1,7	-2,3	-2,1

1. Sumidero Arroyo Caliente (8/79); 2. Cueva del Pensador (8/79); 3. Resolladero Arroyo Caliente (8/79); 4. Hoyo del Agua (8/79); 5. Cueva Río Domingo (8/79); 6. Arroyo de los Nombres (8/79); 7. Ojo del Agua Pica Pica (2/80); 8. Río Cuyaguatzeje, Valle San Carlos (8/79); 9. Arroyo en alturas de Pizarras del Norte (12/81); 10. Arroyo con travertina, nacimiento (11/81); 11. Sumidero La Cueva La Viuda (12/81); 12. Sumidero Candelero (8/79); 13. Resolladero Candelero (8/79); 14. Pozo Guayabo (8/79); 15. Manantial Mal Paso (8/79); 16. Boniato Caliente, Portales (8/79); 17. Pozo la Grifa (5/81); 18. Pozo Cortés. (5/81).

medios geológicos e hidrológicos. En general, existe una mayor tendencia a la saturación y sobresaturación respecto a la calcita y la dolomita en las aguas cársicas, a la insaturación respecto a estos minerales en las no cársicas. Con respecto al yeso todas se encuentran insaturadas. En el caso de los ríos superficiales y en las aguas de cueva son insaturadas respecto a los minerales carbonatados, por efecto de las lluvias.

Región del Pan de Guajaibón y otras áreas de la sierra del Rosario.

Debido a la complejidad geológica e hidrogeológica de esta región, se originan aguas de diverso tipo y propiedades químico-físicas, como se ilustra en la figura 5. Las aguas de la zona de alimentación de los macizos carbonatados poseen por lo general, un contenido alto de CO_2 y bajos valores de pH. Se encuentran, en sentido general, insaturadas respecto a la calcita, la dolomita y el yeso, aunque en épocas de seca, alcanzan valores de sobresaturación en los primeros casos, son del tipo bicarbonatadas cálcicas.

Las aguas que proceden de los acuíferos no cársicos desarrollados en sedimentos arcillo-arenosos, fuera del macizo carbonatado (No. 3), son del tipo bicarbonatado cálcico-sódico con baja mineralización, dureza y contenido de CO_2 . Se encuentran insaturadas con respecto a los minerales de referencia. Sin embargo, las corrientes superficiales que se originan en estos sedimentos (No. 4) incrementan sensiblemente su mineralización y dureza como resultado de su interacción con rocas carbonatado-terrigenas que afloran a través de su curso.

También son del tipo bicarbonatadas cálcico-sódico y, por lo general, se encuentran sobresaturadas respecto a la calcita y la dolomita. En estas condiciones, penetran en los macizos carbonatados a través de ponores; en su interior se mezclan con aguas autóctonas que se infiltran a través del macizo y en la resurgencia aparecen con menor grado de dureza y mineralización, con un comportamiento del tipo bicarbonatadas cálcicas (No. 5); se encuentran sobresaturadas respecto a los minerales carbonatados e insaturadas respecto al yeso. En forma similar se comportan las aguas de las exurgencias cálcicas cuya alimentación es sólo de tipo autóctono.

Las aguas de cueva (No. 2), al igual que en la sierra de los Organos, poseen poco contenido de CO_2 , elevado pH y valores relativamente moderados de mineralización y dureza. En cuanto a su tipo y comportamiento frente a los minerales de referencia son semejantes a las emergencias.

En la región de Mil Cumbres, donde las aguas de las precipitaciones se infiltran a través de secuencias carbonatado-terrigenas, las emergencias (No. 6) poseen un elevado contenido de CO_2 , una mineralización y dureza relativamente altas y el contenido de SO_4^{2+} es superior a las de la zona del

Pan de Guajaibón. Estas aguas permanecen insaturadas respecto a la calcita, la dolomita y el yeso. En su recorrido subaéreo liberan parte del gas disuelto, precipitando CaCO_3 en los rápidos y cascadas.

Las aguas superficiales asociadas a las serpentinitas son del tipo bicarbonatadas magnesianas (No. 7), muestran elevados valores de pH, la dureza y mineralización son relativamente altas. Un pozo profundo, perforado en estas secuencias (No. 6) resultó ser de tipo artesiano. Sus aguas tienen un pH muy bajo (del orden de 2,7), elevada mineralización y dureza y son del tipo bicarbonatadas sódico-magnesianas e insaturadas respecto a los minerales estudiados.

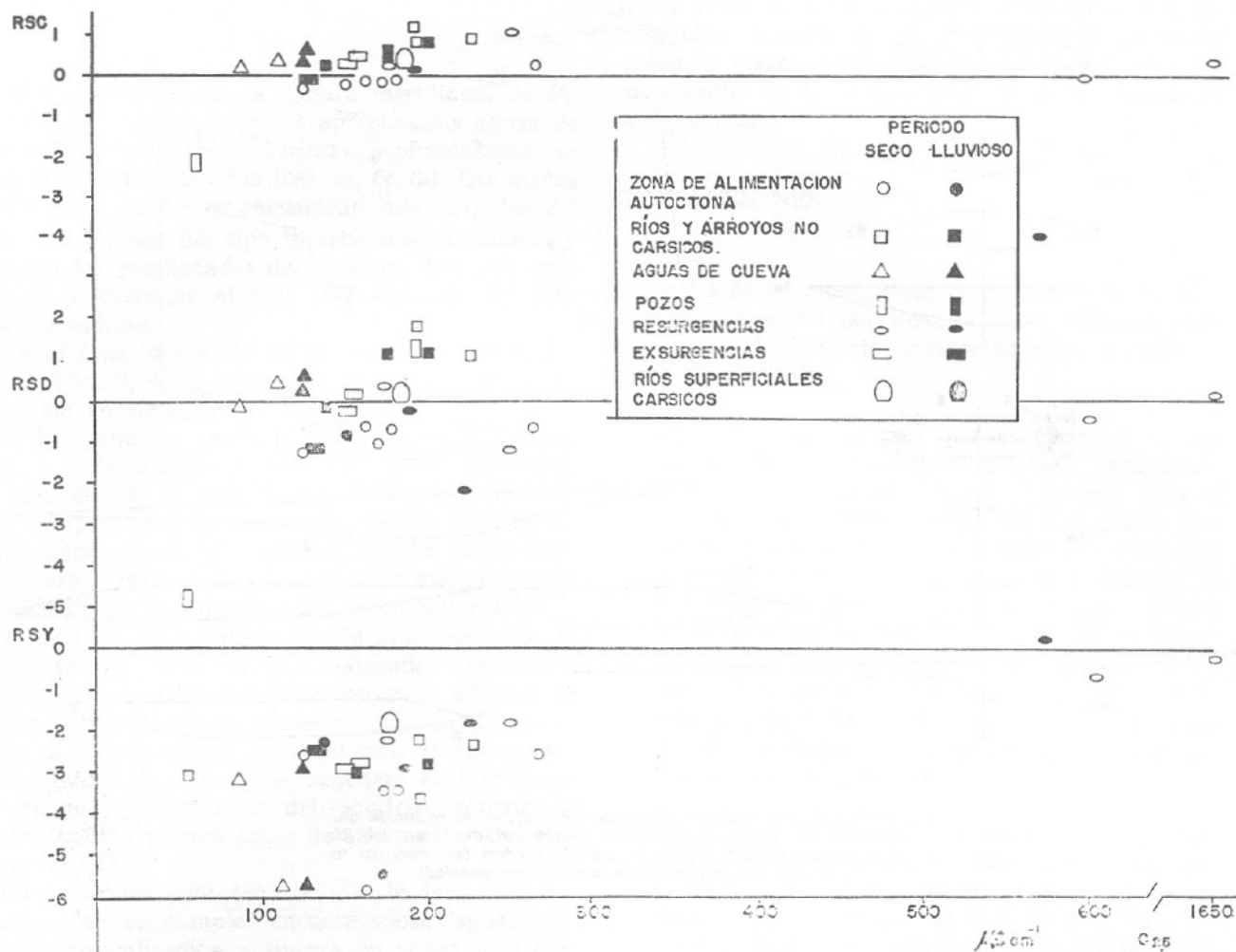
El río San Marcos (No. 9), principal colector de esta región, refleja en sus propiedades químico-físicas el aporte de los distintos tipos de aguas.

Los ríos y arroyos que corren hacia el Sur sobre secuencias carbonatadas y terrigeno-carbonatadas de la sierra del Rosario tienen un comportamiento similar a los que lo hacen por litologías semejantes hacia la vertiente Norte. El rasgo distintivo lo ofrecen las aguas que emergen en la zona de la falla Pinar, desde profundidades relativamente grandes, con elevados valores de temperatura, contenido de CO_2 , dureza y mineralización, y son de los tipos sulfatadas cálcico-sódicas y sulfatadas cálcicas (No. 11 y 12).

En la figura 6 se muestra el comportamiento de las aguas de la región respecto a los índices de saturación. En general tienden a presentarse insaturadas respecto a la calcita, sobresaturadas respecto a la dolomita e insaturadas respecto al yeso. Las aguas de origen profundo, con elevados contenidos de SO_4^{2-} , tienden a la saturación respecto a este último mineral. Como consecuencia de las lluvias, al igual que en la sierra de los Organos, muchas aguas que permanecen generalmente sobresaturadas se hacen insaturadas, principalmente las superficiales.

Llanura meridional de Pinar del Río

En la figura 7 se presentan los resultados de las propiedades químico-físicas de las aguas del acuífe-



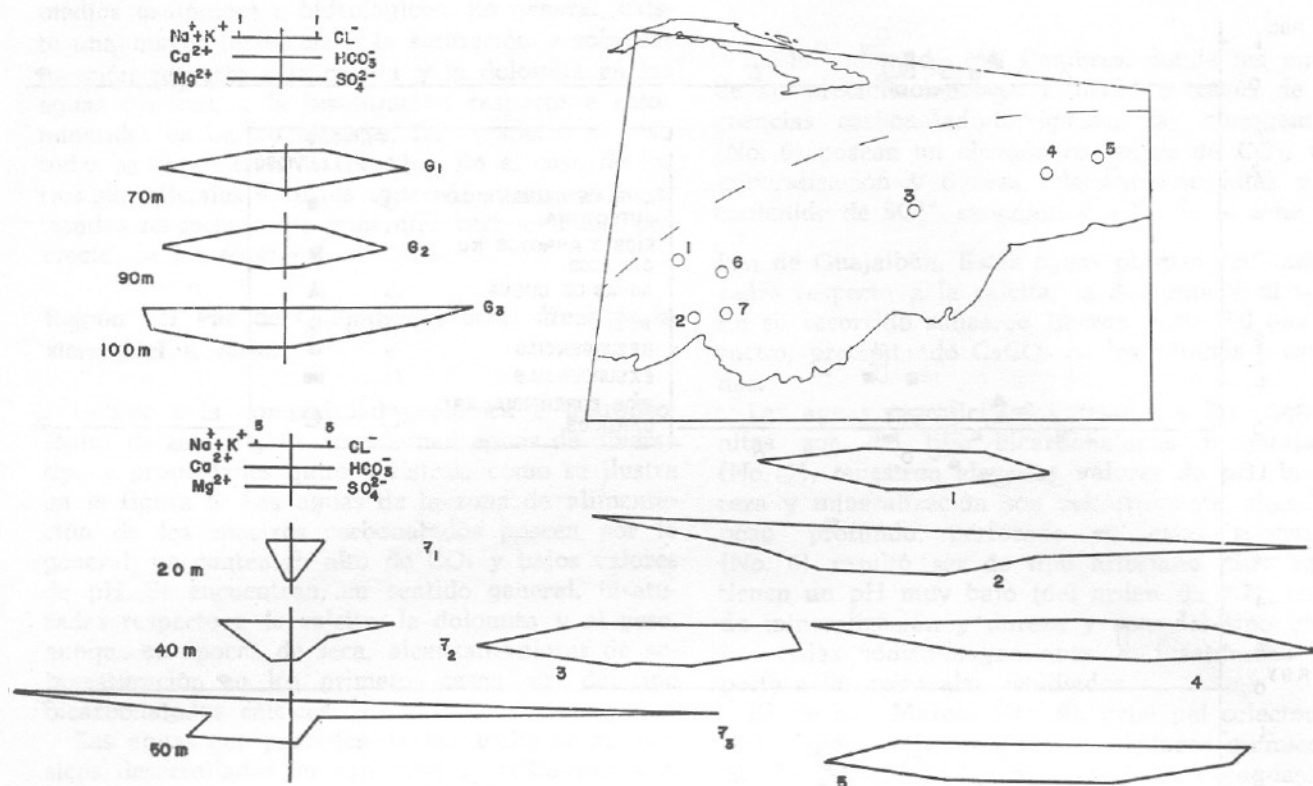
6. Comportamiento químico-físico de las aguas del sector de la sierra del Rosario comprendido entre la sierra de Cajalbana y la Sierra de la Güira, en relación con los índices de saturación de la calcita (RSC), la dolomita (RSD) y el yeso (RSY).

Comportamiento químico-físico de las aguas del Pan de Guajalibón y los alrededores en la Sierra del Rosario.

Tabla 2.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
T	24,1	22,2	21,7	24,7	22,2	22,8	23,8	26,8	20,8	16,6	27,0	31,8
CO ₂	8,9	0	2,8	1,1	2,5	17,6	1,7	278,3	0	0	30,8	94,8
pH	7,5	8,3	7,7	8,1	8,1	6,7	8,3	2,7	7,7	8,8	7,0	6,8
CaCO ₃	162	110	52	197	170	219	200	569	175	192	590	1650
CE ₂₅	233	225	123	518	295	435	340	2050	325	380	990	2180
ΣM	144	140	76	321	183	270	211	1271	202	236	614	1352
RSC	-0,04	0,4	-0,6	0,8	0,5	-0,6	-0,6	-4,0	0,2	1,3	-0,0	0,3
RSD	-0,7	0,3	-2,0	1,4	0,6	-2,1	0,6	-7,5	-0,2	1,8	-0,5	0,2
RSY	-1,7	-1,0	-3,3	-2,8	-2,3	-1,7	-3,8	-2,5	-2,0	-2,2	-0,7	-0,1

1. Aguada de la Macagua (9/84); 2. Cueva Lechuza-Ducha (1/84); 3. Pozo Mineros (2/85); 4. Sumidero Mamey (10/84); 5. Resurgencia Canilla (2/85); 6. Manantial Mil Cumbres (9/85); 7. Arroyo Serpentinita (2/86); 8. Pozo el Sitio (5/86); 9. Río San Marcos (1/86); 10. Pñor Río Taco (2/85); 11. Manantial Cueva Portales (5/85); 12. Baño de los Bermejales (2/85).



7. Representación mediante diaframas de Stiff, de la evolución química de las aguas de la llanura meridional de Pinar del Río a lo largo del perfil N-S y en sentido vertical (en muestras tomadas por batometría a distinta profundidad)

Comportamiento químico-físico de las aguas de los pozos de la llanura meridional de Pinar del Río.

TABLA 3.

	1	2	3	4	5	6 ₁	6 ₂	6 ₃	7 ₁	7 ₂	7 ₃
T ^o	27,0	26,5	25,0	25,0	25,0	25	24	24	25	24	24
CO ₂	14,7	4,3	10,1	31,5	12,1	14,0	3,7	4,3	10,1	12,7	6,4
pH	7,3	7,8	7,5	7,2	7,5	7,3	7,8	7,8	7,4	7,5	7,5
CaCO ₃	216	315	302	504	410	168	160	208	162	397	124
CE ₂₅	568	1376	752	936	1000	449	469	946	732	1660	6604
ΣM	352	853	466	396	620	278	291	525	454	1029	4094
RSC	0,01	0,4	0,3	0,3	0,4	-0,1	0,3	0,4	-0,3	0,1	0,2
RSD	-0,8	-0,8	0,2	0,4	0,6	-1,3	-0,4	0,3	-0,6	0,2	0,8
RSY	-2,7	-2,0	-1,9	-1,6	-1,6	-3,0	-2,6	-3,1	-6,0	-2,2	-1,8

1. Pinar del Río (4/85); 2. La Coloma (4/85); 3. Los Palacios (4/89); 4. Aguacate; 5. Candelaria (4/85); 6. Pozo PS11-2A (12/84; 6₁-70m; 6₂-70m; 6₃-100m); 7. Pozo PS9-5 (12/84; 7₁-20m; 7₂-40m; 7₃-50 m).

ro cársico cubierto de la llanura meridional de Pinar del Río. Como se puede apreciar, las aguas de los pozos, tomadas a distintas profundidades, se encuentran estratificadas (No. 61, 62, 63). Las menos profundas, cuando se encuentran más alejadas del mar (No. 1) son del tipo bicarbonatadas cálcicas y reflejan las propiedades del acuífero. Las más profundas y cercanas al mar (No. 63) son del tipo cloruro sódicas.

En el área localizada entre ambos extremos, las aguas (No. 3, 4, 5) adquieren una composición intermedia en dependencia del grado de mezcla.

A lo largo de perfiles en dirección Norte-Sur (No. 1 y 2) también se evidencia como tendencia, el aumento de mineralización y dureza a medida que se aproximan al mar. El contenido de CO_2 de estas aguas en sentido general es alto en el área de recarga, luego desciende a medida que interactúa con los depósitos calcáreos, incrementándose el pH, la dureza y la mineralización. En este recorrido las aguas se van haciendo más saturadas respecto a la calcita y la dolomita, disminuyendo además su grado de insaturación respecto al yeso. Con respecto a los minerales carbonatados, la fuente suministradora de CO_2 no se regenera en las condiciones de confinamiento del acuífero, ocurriendo la disolución en condiciones de sistema cerrado respecto al CO_2 .

En ocasiones esta tendencia a lo largo de los perfiles no se cumple, encontrándose aguas con mayor mineralización y dureza en zonas más alejadas del mar. Esto se debe a la creación de conos de dispersión locales debido a la sobreexplotación de los acuíferos para el regadío y a la existencia de direcciones preferenciales de drenaje debido a las propiedades anisotrópicas del carso.

En la figura 8 se ilustra el comportamiento de las aguas de esta región en relación con los indi-

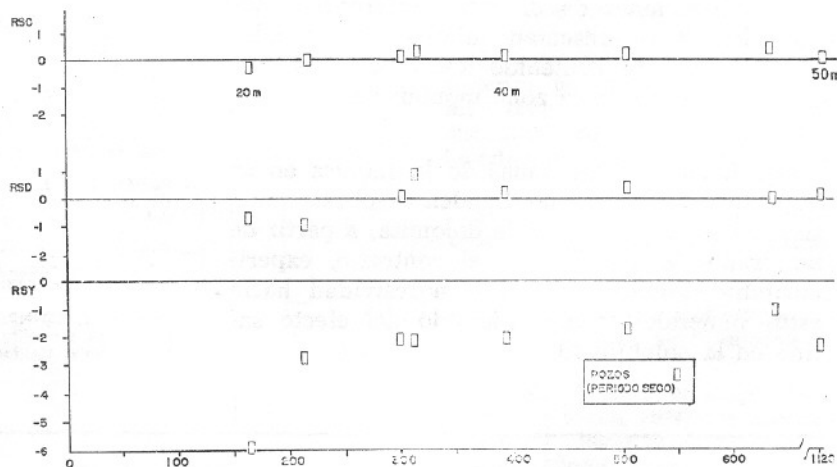
ces de saturación. Mayormente abundan las saturadas respecto a los minerales carbonatados e insaturados respecto al yeso; a partir de un cierto grado de mezcla, por el contrario, experimentan un incremento en la agresividad hacia los minerales carbonatados.

CONCLUSIONES.

En las áreas montañosas de la sierra de los Organos y la sierra del Rosario las aguas naturales presentan el siguiente comportamiento químico-físico:

- Las aguas no cársicas que se originan en las alturas de Pizarras presentan baja mineralización, poco contenido iónico y presión parcial de CO_2 relativamente alta. En la medida que interesan secuencias carbonatadas o se mueven a través de los macizos cársicos disminuye el contenido de gas, se eleva el pH y aumenta la mineralización, cambiando su tipo de bicarbonatada sódica a bicarbonatada cálcica. En un inicio las aguas son insaturadas respecto a la calcita y la dolomita. Luego se hacen saturadas y sobresaturadas a medida que el trayecto carbonatado es mayor.
- En el sentido vertical, las aguas siguen la tendencia anterior hasta su emergencia por manantiales que se encuentran en la zona de saturación. El contenido de CO_2 es muy bajo en las cavidades como resultado de la evaporación de este gas y precipitación de CaCO_3 . Todas estas aguas son del tipo bicarbonatadas cálcicas, aunque existen algunas diferencias en sus relaciones iónicas que reflejan diferentes grados de dolomitización. Las aguas que emergen desde zonas más profundas poseen una temperatura y contenido de SO_4^{2-} relativamente altos.

8. Comportamiento químico-físico de las aguas de la llanura meridional de Pinar del Río a lo largo del perfil N-S, en relación con los índices de saturación de la calcita (RSC), la dolomita (RSD) y el yeso (RSY).



Tienen, además, relativamente alta la mineralización y la dureza, tendiendo a la saturación respecto al yeso.

Las aguas que se originan en las formaciones terrígeno-carbonatadas muy trituradas por el tectonismo, muestran un elevado contenido de CO_2 y alta mineralización en la zona de recarga. En su ruta hacia los macizos carbonatados liberan parte de este gas, principalmente en los rápidos y cascadas, precipitando la calcita. En el interior de los macizos estas aguas se mezclan con otras de tipo alóctona o autóctona y se producen cambios en la capacidad de disolución de los minerales.

- El efecto de las diversas litologías presentes en la cordillera de Guaniguanico se refleja en los distintos tipos geoquímicos de aguas que existen.

En general, predominan las bicarbonatadas cálcicas. Además, existen bicarbonatadas cálcico-sódicas y sódico-cálcicas, bicarbonatadas magnesianas (asociadas a la serpentinitas) y en el caso de las de origen profundo, bicarbonatadas cálcicas sulfatadas cálcico-sódicas y sulfatadas cálcicas. El efecto climático se pone de manifiesto en las aguas, especialmente las superficiales, en los períodos de grandes precipitaciones, aumentando sensiblemente su agresividad hacia los minerales calcita, dolomita y yeso.

- En el área de la llanura las aguas subterráneas se encuentran estratificadas. Las de los niveles superiores reflejan las propiedades litológicas del acuífero mientras que las de los niveles inferiores denotan la influencia del agua de mar en ellos presente. Esta misma tendencia se observa a lo largo de perfiles en dirección Norte-Sur. El grado de intrusión marina de estas aguas depende del nivel de explotación de los acuíferos para el regadío y de la presencia o no de direcciones de drenaje preferencial. En todos los casos presentan valores de mineralización, dureza y contenido iónico superiores a los de las aguas en la zona montañosa.

Como tendencia, las aguas de la llanura en su trayectoria hacia el mar tienden a sobresaturarse respecto a la calcita y la dolomita; a partir de un grado de mezcla, por el contrario, experimentan un incremento de la agresividad hacia estos minerales, como resultado del efecto salino en la solubilidad.

BIBLIOGRAFIA

- Arellano, M.: "A study of karstic groundwater circulation using natural isotopes. Case history: Pinar del Río Province, Cuba". Dissertation Thesis, 194 p, Charles University, Prague, 1986.
- Arellano, M. y J. R. Fagundo: "Criterio acerca de la zonación geoquímica de un acuífero cársico mediante índices químico-físicos, parámetros hidroquímicos y relaciones iónicas". *Voluntad Hidráulica* 22, 2-13, 1985.
- Back, W.: "Calcium carbonate saturation in ground water for routine analysis". U. S. Geol. Survey. Water Supply Paper. 1525-D, 1-13 E.U. 1961.
- De la Cruz, A. y J. Valdés: "Estudio de las aguas kársticas de la Sierra del Pan de Guajabón y sus inmediaciones mediante métodos matemáticos de análisis exploratorio de datos". *Voluntad Hidráulica* 22, 25-34, 1985.
- Fagundo, J. R. y J. Valdés: "Estudio químico-físico del comportamiento de las aguas kársticas de la región de San Antonio de los Baños (La Habana, Cuba) mediante el uso de modelos matemáticos". *Ann. Speleol.* 30 (4) 643-653, 1975.
- ———: "Algoritmo para el cálculo de parámetros e índices químico-físicos y geoquímicos en aguas naturales altamente mineralizadas". *Revista Ciencias Químicas*, 1986.
- Fagundo J. R., J. Valdés, J. Rodríguez: "Comportamiento químico-físico de las aguas kársticas de la cuenca del río Cuyaguataje". *Ingeniería Hidráulica* 2 (3) 261-274, 1981.
- Fagundo J. R., J. Valdés, J. Rodríguez, J. Pajón, A. de la Cruz y M. Pulina: "Estudio preliminar sobre el proceso de denudación cársica en el polígono experimental cubano-polaco del Pan de Guajabón". *Voluntad Hidráulica* 22, 11-15, 1986.
- Fagundo J. R., J. Valdés y J. Pajón: "Estudio de los sedimentos Cuaternarios de la cuenca del río Cuyaguataje mediante espectroscopía IR y Difracción de Rayos X". *Voluntad Hidráulica* 21, 53-61, 1986.
- Garret, R. M. and C. I. Christ: "Solutions, minerals and equilibrio", Harper and Row, 450 p. New York, 1965.
- Gutiérrez, J.: "Clasificación y representación gráfica de las aguas naturales. Seminario 'Procesamiento y Evaluación de Datos Hidroquímicos'". 19 p. Instituto de Hidroeconomía, 1982.
- Jacobson, R. and D. Langmuir: "An accurate method for calculating saturation levels of ground waters with respect to calcite and dolomite". *Trans. Cave Research Group Great Britain* 14 (2) 104-108, 1972.
- Kempe, S.: "A computer program for hydrochemical problems in karstic water". *Ann. Speleol.* 30 (4) 699-702, 1975.
- Markowicz, L. y M. Pulina: "Hłóściowa Pólmikroanaliza chemiczna wód w obszarach krasu wielonowego". *Univ. Slaski, Katowice* 67 p. 1979.
- Maximov: Informe de los resultados de los trabajos complejos geológico-geofísicos a escala 1:50 000 en la zona de Bahía Honda. *Archivo Emp. Geología de Pinar del Río*, 1978.
- Piotrowska, K.: "Nappe structures in the Sierra de los Organos Western Cuba". *Acta Geol. Polonica*. 28 (1) 97-170, 1978.
- Pszczolkowski, A.: "Geosynclinal Sequences of the Cordillera de Guaniguanico in Western Cuba; their lithostratigraphy, facies development; and paleogeography". *Acta. Geol. Polonica*. 28 (1) 1-96, 1978.
- Pulina, M., J. R. Fagundo, J. Valdés, J. Rodríguez, A. Kozik, J. P. Glowacki, J. Pajón, A. de la Cruz and A. García: "The Dynamic of the contemporary karstic processes in the tropical area of Cuba". *Univ. Slaski, Sosnowiec*, 40, 1984.
- Rodríguez, R.: "Caracterización hidrólogo-hidrogeológica del curso de la cuenca del río Cuyaguataje. Pinar del Río. Cuba. Coloquio Internacional sobre Hidrología Cársica de la región del Caribe. C. Habana, 1984, 150-177. Tesis de Diploma 1984. Univ. Habana, 69 p.
- Valdés, J. y J. R. Fagundo: "Ocurrencia de estalactitas excéntricas de aragonito de la Cueva Perfecto (Sierra de los Organos, Pinar del Río)". *Ann. Speleol.* 30 (4) 761-766, 1975.
- Valdés, J., J. R. Fagundo: "Aplicación de los métodos numéricos al estudio hidrogeoquímico de la cuenca del río Cuyaguataje". *Ingeniería Hidráulica* 2 (3), 275-286, 1981.
- Wolery, J. EQ3NR: A computer program for geochemical aqueous speciation solubility calculations. User Guide and Documentation. 191 p. Univ. California. 1983.