

# **CARACTERIZACIÓN HIDROGEOQUÍMICA DEL SISTEMA DE FLUJO QUE DRENA LOS MACIZOS DE LA SIERRA DEL ROSARIO.**

**Autores: Dr. Juan Reynerio Fagundo<sup>1</sup>**

**Dr. Joel Carrillo<sup>2</sup>**

**Dr. Iñaki Antigüedad<sup>3</sup>**

**MSc. Margaret Suárez<sup>1</sup>**

**Dra. Patricia González<sup>1</sup>**

**Lic. Clara Melián<sup>1</sup>**

**Lic. Jesús Pajón<sup>4</sup>**

**Ing. Roberto Peláez<sup>5</sup>**

**Institutos: <sup>(1)</sup> Centro Nacional de Termalismo “V́ctor Santamarina”**

**<sup>(2)</sup> Instituto de Geografía UNAM, México**

**<sup>(3)</sup> Universidad del País Vasco**

**<sup>(4)</sup> Instituto de Geofísica y Astronomía**

**<sup>(5)</sup> Empresa GEOMINERA, Pinar del Río**

**Email: [juanrfag@infomed.sld.cu](mailto:juanrfag@infomed.sld.cu)**

## **RESUMEN**

En el presente trabajo se muestran los resultados de la caracterización hidroquímica de muestras de aguas tomadas de manera sistemática en diferentes sitios de la Sierra del Rosario desde 1984 hasta el 2002, así como a partir de datos tomados de un informe geológico, correspondientes a flujos de diferente naturaleza hidrológica que drenan rocas carbonatadas, silicatos ácidos y rocas ultrabásicas con edades que van desde el Paleógeno hasta el Jurásico. Los datos fueron procesados mediante modelos químico-físicos basados en el equilibrio químico, así como mediante modelos estadísticos.

Se demuestra que las propiedades químico-físicas de estas aguas dependen de las interacciones agua-roca durante el tiempo de contacto que media desde la infiltración hasta su emergencia y de la constitución de los materiales acuíferos que drenan, y que es posible caracterizar los diferentes flujos (locales, intermedios y regionales) sobre la base de un grupo de indicadores geoquímicos.

Mediante la aplicación de modelos hidrogeoquímicos de balance de masas y mezcla de aguas se determina el origen de la composición química de aguas de diferente naturaleza hidrogeológica (flujos locales, intermedios y regionales) que drenan diferentes litología (calizas, esquistos y areniscas, rocas ultrabásicas) en la Sierra del Rosario. Aplicando modelos de tipo estadístico (regresión y correlación lineal) se establecen 7 líneas de flujo o de evolución química de las aguas a partir de las precipitaciones.

## **ABSTRACT**

In this paper are presented the results of the water hydrochemical characterization at Sierra del Rosario, Cuba. This study was carried out between 1984 to 2002 from a systematic monitoring complemented with information about prospecting work, corresponding to flows of different hydrogeologic nature which drain limestone, schist, sandstone and ultra-basic rocks, with ages from Paleocene to Jurassic. The data was processed by means of statistics, and based on chemical equilibrium physico-chemist models. The results demonstrate that the physicochemical properties of the water are controlled by the water - rock interaction during the contact time from the infiltration of the precipitation to the emission of the waters, and by the constitution of the aquifer materials. By means of a geochemist indices group, the different type of flows (local, intermediate, and regional) are characterized.

By means of mass balance and mixing hydrogeochemical models, the chemical composition origin of the waters from different hydrogeologic nature (local, intermediate and regional flows) which drain different lithology (limestone, schist, sandstone and ultra-basic rocks) was determined. Applying regression and correlation analysis 7 flow lines or evolution path from the precipitation were established.

## **INTRODUCCIÓN**

Durante los últimos cuarenta años se han realizado varias importantes contribuciones que permiten adquirir mejor conocimiento acerca de la hidrogeología de la Sierra del Rosario en la provincia e Pinar del Río. Sin embargo, la mayor parte de los resultados que relacionan la química de las aguas con la geología han sido presentados de manera aislada, faltando una integración de los mismos.

La abrupta topografía de las montañas en el área de estudio ha sufrido poco cambio medioambiental, en virtud de la poca población que la habita, la cual se ha confinado principalmente al pie de los macizos montañosos. Por esa razón, la fauna y flora autóctona locales han sufrido menos impacto humano que en otras la región, a lo que también ha contribuido la declaración por la UNESCO de la Sierra del Rosario como Reserva de la Biosfera en 1985.

Desde el punto de vista geológico e hidrogeológico, el área de estudio es muy heterogénea. Existe un gran número de manantiales que presentan aguas con muy diferentes calidades. Las investigaciones realizadas por Fagundo y colaboradores desde 1984, sobre la denudación química del karst tropical y el control de la composición química de las aguas (Pulina y Fagundo, 1984, 1992, 1995; Rodríguez et al, 1985; Fagundo et al, 1986; 1995; 1997; 1998), sobre las aguas minerales de la región (Fagundo et al., 2000a; 2000b, 2001; 2003; Peña et al., 2001; González et al., 2001; 2002; Llerena et al, 2001), así como los estudios efectuados por Peláez et al. (1990) relacionados con la prospección de aguas minerales y mineromedicinales, han suministrado una abundante información que permite establecer el control geológico sobre los recursos de aguas subterráneas en la región. De estos estudios se infiere que los múltiples manantiales de diferente naturaleza hidrogeológica que ocurren en la región se deben a la naturaleza kárstica del terreno, a la disposición de las secuencias estratigráficas presentes y a los procesos de interacción agua-roca correspondientes. Por esa razón, es interesante estudiar el origen de los manantiales con relación a las características geológicas locales.

El objetivo principal de este trabajo es ordenar la información sobre la química de las fuentes de aguas subterráneas disponibles acorde a las peculiaridades geológicas del sitio, y establecer las principales regularidades que caracterizan los grupos seleccionados. Además, mediante la modelación hidrogeoquímica de los datos de componentes mayoritarios y mediciones de campo, determinar el origen de la composición química de cada tipo (grupo) de agua, así como los procesos de interacción agua-roca y de mezcla de aguas. Por último, definir las líneas de flujo (evolución química) existentes a partir de las lluvias que drenan los macizos, a partir del estudio de los cambios de la temperatura y de la composición iónica y mineralización total.

### **Marco geográfico, geológico e hidrogeológico**

La parte central del área de estudio se encuentra localizada aproximadamente a 100 km del sudoeste de la ciudad de La Habana (Figura 1) y ocupa una superficie de 1 125 km<sup>2</sup>. Las condiciones climáticas están controladas por dos factores principales, la elevación con respecto al nivel del mar del sitio y la distancia a la costa marina (Pulina y Fagundo, 1984). La mayor elevación y más destacado relieve lo constituye el Pan de Guajaibón, con una 699 m de altura sobre el nivel del mar. Las temperaturas medias anuales en esta parte del territorio y la costa marina son de 23° C y 25° C, respectivamente. Las temperaturas máximas y mínimas registradas en el occidente de Cuba son 36° C y 2° C, respectivamente. Los meses más calientes son Julio y Agosto y los más fríos Diciembre y Enero. Las precipitaciones anuales en la Sierra del Rosario son del orden de 2 000 mm, de las cuales 1 600 mm caen durante los meses más lluviosos (Mayo a Octubre) y 400 mm durante los meses más secos (Noviembre a Abril). Las precipitaciones registradas disminuyen en los territorios de más bajo nivel topográfico (alrededor de 1 050 mm anuales).

La geología de la Sierra del Rosario se caracteriza por una complejidad litológica y estructural, como consecuencia del desplazamiento y transporte tectónico de rocas ocurrido durante el Eoceno Medio (Pszczoikowski, 1978). En el área se aprecian tres unidades fisiográficas principales paralelas e intercaladas entre sí, constituidas por calizas, esquistos - areniscas y rocas ultrabásicas, las cuales están limitadas al sur y al oeste por las fallas Pinar y San Diego respectivamente. Estas características morfológicas hacen que las aguas almacenadas por las

secuencias más permeables emergen en los contactos con las menos permeables, originando arroyos y ríos que vierten sus aguas al Golfo de México (ríos San Marcos, Bahía Honda y Nazareno) o hacia el Mar Caribe (ríos Caiguanabo, Los Palacios, Santa Cruz, San Cristóbal, Bayate y San Juan).

Las unidades geológicas que afloran en el área se describen ligeramente a continuación desde las más antiguas hasta las más recientes. La caracterización general de las mismas es complementada por una descripción mineralógica tomada de los análisis efectuados a los testigos de perforación durante los trabajos de prospección en el área, cuya información aparece en los correspondientes informes (Pelález et al., 1990).

La Fm. San Cayetano ( $J_1$ - $J_3$ ) es la unidad más antigua que aflora en la Sierra del Rosario. Es de edad Jurásico inferior (Oxfordiano) y se compone de areniscas cuarzosas, pizarras, lutitas, argilitas, esquistos filitizados y material carbonoso. Su espesor puede alcanzar hasta 3 000 m. Ocasionalmente los poros de las areniscas se encuentran cementados por arcillas y material ferruginoso, raramente son encontrados en estas rocas estratos de calizas. En la localidad de San Diego de los Baños su potencia es de 1 000 m., y se ha reportado (Pelález et al, 1990) que contienen: cuarzo (60-75 %); plagioclasa (2-5 %); moscovita (1-2 %); titanio (<1%), apatito (<1%), circonio (<1%), turmalina (<1%), sustancias carbonosas (<1%) piritita en forma dispersa.

La Fm. Artemisa ( $J_3$ - $K_1$ ) es la mas ampliamente distribuida en el área, pertenece al Jurásico superior – Cretácico inferior. Está representada por calizas estratificadas (micritas, biomicritas) con intercalaciones de silicitas en la parte superior del corte. Su espesor total es aproximadamente de 800 m (Pszczolkowski, 1978). Localmente está representada por calizas (80-95%), material carbonoso (5-15%), cuarzo (<1%), titanio (<1%), y minerales oxidados. En ocasiones presenta capas de materia arcillo ferruginosa (Pelález et al, 1990).

La Fm. Sierra Azul ( $K_{1-2}$ ) pertenece al Cretáceo inferior-superior y está representado por material terrígeno carbonatado, así como por calizas, calizas margosas, argilitas y silicitas. Su espesor es de 600 m (Pszczolkowski, 1978).

La Fm. Guajaibón ( $K_{1-2}$ ) se originó en el Cretáceo superior (Albiano – Cenomaniano). Se estima que su espesor máximo es de 600 m.

La Fm. Cacarajícara ( $K_2$ ), es también del Cretáceo superior (Maestrichtiano) y se compone de brechas calcáreas, calcilitas y en ocasiones de fragmentos de rocas volcánicas (traquita). Se reporta con menos frecuencia la presencia de rocas volcánicas alcalinas. Su máximo espesor es de 450 m, aunque en algunas localidades este es sólo de 50 m.

A la Fm. Manacas ( $P_{1-2}$ ) se le ha asignado una edad indiferenciada Paleógeno – Eoceno. Esta unidad fue previamente nombrada Fm. Pica Pica y posee una potencia máxima estimada de 200 m. La misma está constituida por areniscas, esquistos, calizas y olistostromas (Pszczolkowski, 1978). Localmente el material no carbonatado se compone de: fragmentos de rocas basálticas (1%), cuarzo (10%), calizas (25%), plagioclasa (30%). También se han encontrado impurezas de arcillas ferruginosas, vidrio volcánico y apatito.

Debido a la prevalencia del relieve kárstico en la región, la infiltración de las precipitaciones a través de los macizos es instantánea y de carácter gravitatorio. Las zonas hidrogeológicas en los macizos kársticos han sido definidas por la relativa posición del nivel piezométrico y el movimiento del agua en la zona vadosa. Una zona transicional definida por la posición relativa de las aguas de lluvia que discurren por el suelo hasta alcanzar el nivel piezométrico, consiste en cuevas que almacenan aguas periódicamente. Estas cuevas alcanzan una profundidad de hasta 100 m y menos frecuentemente profundidades del orden de 300 – 350 m. Algunas de estas cavernas se encuentran a menudo inundadas y se observan surgencias laterales a través de manantiales con caudales de varios litros por segundo, cuyas aguas no son capaces de seguir su recorrido subterráneo hacia abajo hasta contactar con sedimentos impermeables. Las cuevas constituyen conductos subterráneos originados por disolución química y la posición del nivel piezométrico ha sido establecida por observaciones de campo y perforaciones de pozos. Investigaciones espeleológicas recientes han confirmado la existencia de extensos sistemas cavernarios en la zona de transición.

La información relacionada con las propiedades hidráulicas de las unidades que integran los diferentes complejos hidrogeológicos de la Sierra del Rosario es escasa, con excepción de aquellos sitios donde se han hecho trabajos de prospección con fines mineros y de búsqueda de aguas mineromedicinales (Peláez et al., 1990). Los gastos específicos determinados en los pozos perforados en los materiales constitutivos (esquistos, pizarras y areniscas cuarzosas) de la Fm San Cayetano, fueron bajos del orden de 0.7 a 4.6 l/s/m (pozos P1, P2 y P3).

Los esquistos, areniscas y calizas de la Fm. Manacas son también poco acuíferos. En los manantiales muestreados los caudales son inferiores a 1 l/s.

Los manantiales originados en las calizas de la Fm. Guajaibón, representado en el área por la surgencia Ancón presenta caudales del orden de 72 l/s en los meses más secos y del orden de 528 l/s en los meses más lluviosos (Rodríguez, et al., 1985).

Los manantiales de la zona de emisión de los acuíferos desarrollados en los materiales de la Fm. Sierra Azul (calizas, calcarenitas, calcilitas, calizas margosas, argilitas y silicitas), así como los relacionados con la Fm. Cacarájicara (constituida por brechas, calcarenitas, esquistos, calizas y olistostromas) poseen caudales algo menores al de las surgencias de la Fm. Guajaibón.

Los caudales de las surgencias kársticas relacionadas con las calizas estratificadas de la Fm Artemisa (constituida por calizas y silicitas) son del orden de 250 l/s, mientras que los pozos perforados en la región presentan gastos específicos del orden de 1.2 a 2.1 l/s/m.

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

Para el desarrollo de este trabajo se utilizaron 365 datos hidroquímicos, a partir de muestreos realizados entre los años 1984 y 2002 (Pulina y Fagundo, 1984; Franco, Fagundo y Pajón, 1987; Peláez et al, 1990; Fagundo et al, 1993; González et al, 2000).

Las mediciones de los parámetros geoquímicos se realizaron en el campo, las más recientes mediante pHmetro y medidor de temperatura y potencial redox (Eh), modelo HI-8424, marca HANNA y oxímetro modelo HI-914, marca HANNA. Los contenidos de CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S, así como la

alcalinidad total ( $\text{HCO}_3^-$  y  $\text{CO}_3^{2-}$ ) fueron también determinados “in situ”, mientras que los restantes macroconstituyentes ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ ) y componentes trazas se analizaron en el laboratorio antes de las 24 horas de tomadas las muestras. Las marchas analíticas se efectuaron mediante las técnicas analíticas estándar (APHA, AWWA, WPCF, 1989) adaptadas para condiciones de campo.

La calidad de los datos fue previamente validada antes de ser procesados mediante varios software, basados en modelos estadísticos, químico-físicos e hidrogeoquímicos, implementados especialmente para los objetivos del trabajo (Alvarez y Fagundo, 1991; Fagundo-Sierra et al., 2001; 2002). Para el cálculo de balance de masas se tomó el ion cloruro como conservativo en el caso de los flujos locales (contenido medio de  $\text{Cl}^-$  del orden de 16.3 mg/l). Para el resto de las aguas (flujos intermedios y regionales), las cantidades de masas correspondientes a cada ion, adquiridas por el agua en el proceso de intemperismo del macizo, se determinaron multiplicando el producto del factor de reconcentración por evapotranspiración (2.88) por la composición media del agua.

## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **Características hidroquímica de los diferentes tipos de aguas.**

Los datos de análisis de agua utilizados en el trabajo, acorde a las características geológicas (litológicas y estructurales) del sitio muestreado y a los tipos de flujos establecidos según el criterio de Tóth (1995), fueron distribuidos en 9 grupos, cuyas características hidrogeológicas e hidroquímicas se describen a continuación:

Grupo 1. Está representado por flujos locales e intermedios que drenan acuíferos no confinados constituidos por esquistos, areniscas y calizas de la Fm. Manacas. Estas aguas se caracterizan por presentar baja temperatura ( $23.3 \pm 2.3$  °C), ligera alcalinidad (pH,  $7.73 \pm 0.41$ ), relativamente bajos contenidos de  $\text{CO}_2$  ( $2.3 \pm 2.0$  mg/l) y cloruro ( $20.1 \pm 4.8$  mg/l) y de minerales disueltos (sólidos solubles totales SST,  $397 \pm 133$  mg/l). La facies hidroquímica típica es  $\text{HCO}_3^- - \text{Ca} > \text{Na}$  y poseen poco contenido de minerales disueltos dada la pobre solubilidad de los aluminosilicatos a baja temperatura. Las relaciones iónicas (Tabla 1) son homogéneas entre sí, poniéndose de manifiesto



la presencia de dos subgrupos bien diferenciados correspondientes a ambos flujos. Los flujos locales se encuentran subsaturados con respecto a la calcita y la dolomita mientras los flujos intermedios tienden a la saturación con respecto a ambos minerales (Figura 2.1). Con relación al yeso ambos flujos se encuentran insaturados.

Grupo 2. Constituido por flujos locales que proceden de manantiales y arroyos procedentes de acuíferos no confinados desarrollados en rocas ultrabásicas de la Asociación Ofiolítica. Estas aguas se distinguen por presentar temperaturas frías ( $23.5 \pm 0.9$  °C), altos valores de pH ( $0.47 \pm 0.40$ ), poco contenido de  $\text{CO}_2$  ( $1.5 \pm 1.5$  mg/l) y  $\text{Cl}^-$  ( $16.1 \pm 2.2$  mg/l), así como moderado SST ( $307 \pm 50$  mg/l). El ambiente en que emergen es oxidante (Eh, 156 mv y 8.4 mg/l  $\text{O}_2$  disuelto) y posee facies hidroquímica del tipo  $\text{HCO}_3^-$  - Mg. En el transcurso de su recorrido, estas aguas alcanzan el equilibrio químico (Figura 2.2) con respecto a la serpentinita (expresada en términos de dolomita), pero no con respecto a la calcita y al yeso dada la poca disponibilidad de estos minerales en el terreno. Al igual que el resto de los flujos de carácter local, estas aguas presentan condiciones oxidantes y poseen relativamente altos contenidos de oxígeno disuelto (Tabla 1).

**Tabla 1. Indicadores geoquímicos del tipo de flujo y litología: temperatura media anual, potencial redox, oxígeno disuelto, contenidos de sulfhídrico y sílice, sólidos solubles totales (TSS), principales relaciones iónicas e índices de saturación con respecto a la calcita (RSC), la dolomita (RSD) y el yeso (RSD). Flujos de diferente naturaleza hidrogeológica en la Sierra del Rosario.**

No	N	T	Eh	$\text{O}_2$	$\text{H}_2\text{S}$	$\text{SiO}_2$	TSS	Ca/ Mg	(Na+K)/ Ca	(Na+K)/ Mg	$\text{SO}_4$ / Ca	$\text{SO}_4$ / $\text{HCO}_3$	Ca/ $\text{HCO}_3$	Mg/ $\text{HCO}_3$	(Na+K)/ $\text{HCO}_3$
1a	5	24.5			0	8.6	134	4.03	0.98	3.38	0.09	0.05	0.55	0.24	0.52
1b	31	22.8			0	14.7	411	3.33	0.65	2.06	0.07	0.04	0.61	0.20	0.38
2	13	23.5	156	8.4	0	18.8	307	0.04	4.63	0.15	0.92	0.03	0.03	0.98	0.14
3a	21	21.7			0	7.4	240	8.11	0.21	1.75	0.05	0.05	0.91	0.14	0.18
3b	14	22.1			0	4.6	365	8.61	0.21	1.47	0.01	0.01	0.82	0.13	0.16
3c	94	22.7			0	4.5	299	7.06	0.23	1.63	0.08	0.07	0.87	0.14	0.19
4a	6	23.1	-174	5.5	0	5.9	424	6.39	0.21	1.32	0.08	0.07	0.86	0.15	0.18
4b	2	23.8	-238	1.6	8.1	12.1	486	5.05	0.63	3.07	0.48	0.40	0.85	0.17	0.53
5a	35	23.4	91.7	5.7	0	5.1	486	11.69	0.24	2.75	0.15	0.14	0.92	0.11	0.21
5b	4	19.2			0	4.1	306	6.45	0.13	0.83	0.13	0.13	0.97	0.15	0.13

6	31	24.5	-228	1.2	10.0	11.3	613	5.49	0.28	1.41	0.11	0.10	0.86	0.18	0.23
7	9	25.6	-327	1.8	106.4	34.6	735	2.70	0.67	1.65	0.26	0.20	0.63	0.28	0.40
8a	1	25.0			0	12.0	345	1.33	9.65	12.87	1.80	0.21	0.12	0.09	1.15
8b	10	27.8	-317	1.2	67.1	26.6	1220	1.05	43.95	10.86	6.71	0.15	0.13	0.12	1.17
9	71	39.5	-300	2.5	24.8	22.0	2280	5.57	0.24	1.31	1.17	7.52	6.22	1.13	1.44

Tipos de flujos: 1a) manantiales y pozos alimentados por flujos locales (areniscas de la Fm. Manacas), 1b) manantiales de flujos intermedios (areniscas de la Fm. Manacas), 2) fuentes de flujos locales e intermedios (rocas ultrabásicas de la Asociación Ofiolítica), 3a) aguas de infiltración en las cuevas (calizas de la Fm. Guajaibón), 3b) manantiales alimentados por flujos locales (calizas de la Fm. Guajaibón), 3c) surgencias y resurgencias kársticas-flujos intermedios (calizas de la Fm. Guajaibón), 4a) surgencias kársticas - flujos intermedios (calizas de la Fm. Sierra Azul), 4b) surgencia que drenan calizas de la Fm. Sierra Azul y calcarenitas de la Fm. Cacarajícara, 5a) manantiales kársticos - flujos locales e intermedios (calizas de la Fm. Artemisa), 5b) surgencias kársticas – flujos intermedios (calizas de la Fm. Artemisa), 6) manantiales alimentados por flujos intermedios procedentes de un drenaje más profundo (calizas de la Fm. Artemisa), 7) manantiales y pozos procedentes de un drenaje más profundo (calizas, areniscas y rocas ultrabásicas), 8a) pozo alimentado por flujos intermedios (areniscas de la Fm. San Cayetano), 8b) manantiales y pozos alimentados por flujos intermedios (areniscas de la formaciones Manacas o San Cayetano), 9) manantiales y pozos alimentados por flujos intermedios y regionales (drenaje por calizas de la Fm. Artemisa y contactos con capas confinantes de areniscas de la Fm. San Cayetano y rocas ultrabásicas).

Grupo 3. Está representado por flujos locales e intermedios que drenan acuíferos no confinados en la zona vadosa del sistema kárstico del macizo del Pan de Guajaibón, constituidos por calizas de la Fm. Guajaibón. Este grupo incluye aguas colectadas en cuevas originadas por percolación de las lluvias a través de las calizas, así como manantiales que emergen en un valle elevado, situado en el propio macizo del Pan de Guajaibón y emergencias kársticas (surgencias y resurgencias) que emergen al pie del macizo. Las aguas de cueva presentan temperaturas frías ( $21.7 \pm 1.2$  °C), alto pH ( $8.17 \pm 0.17$ ) y bajo contenido de  $\text{CO}_2$  ( $1.4 \pm 1.7$  mg/l), mientras que los manantiales y surgencias kársticas poseen magnitudes de pH más bajas ( $7.65 \pm 0.39$ ). El contenido de cloruro es bajo en ambos tipos de agua ( $16.8 \pm 3.8$  mg/l) y la concentración de minerales disueltos (SST) se incrementa dos veces con relación a las aguas de cueva ( $240 \pm 44$  mg/l) de acuerdo a la trayectoria de cada tipo de flujo. La facies hidroquímica es  $\text{HCO}_3$  - Ca.

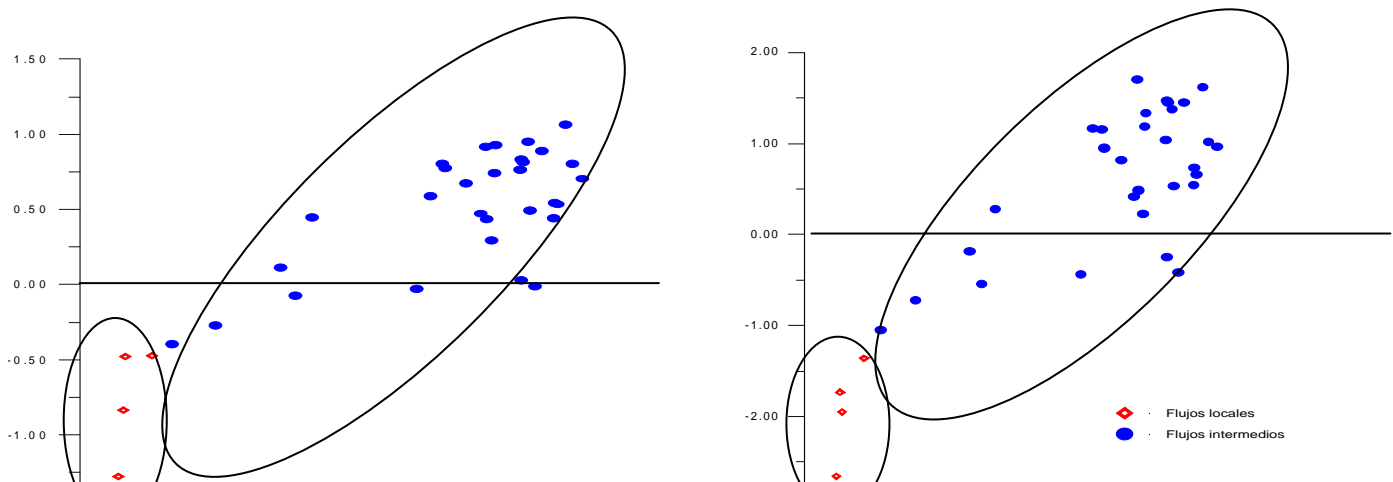


Figura 2.1. Valores de RSC y RSD en función del TDS. Flujos locales e intermedios que drenan esquistos y areniscas de la Fm. Manacas.

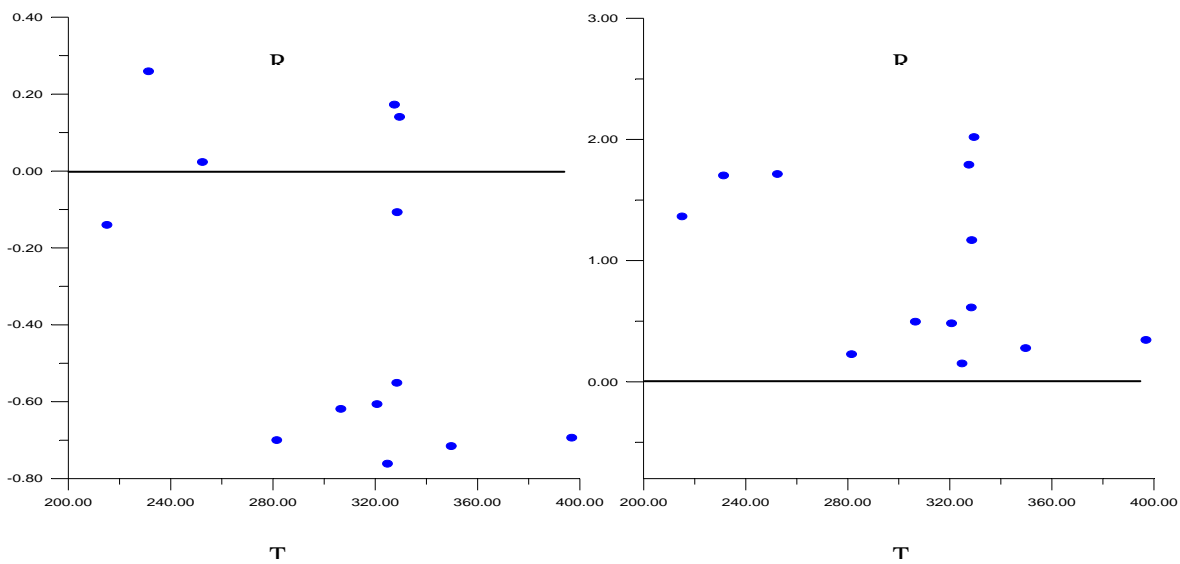


Figura 2.2. Valores de RSC y RSD en función del TDS. Flujos locales que drenan rocas ultrabásicas de la Asociación Ofiolítica.

Se aprecian dos subgrupos: el primero constituido por aguas de infiltración en las cuevas (flujos locales que alimentan acuíferos colgados), se caracteriza por presentar un contenido de  $\text{CO}_2$  y de iones disueltos bajo y un pH más alto que el de las restantes aguas (Tabla 1); el segundo grupo constituido por surgencias, resurgencias y manantiales kársticos posee mayor contenido de  $\text{CO}_2$  y más alto pH (Tabla.1). En el primer subgrupo las aguas tienden a presentarse más veces cercanas al equilibrio químico con respecto a la calcita y la dolomita que en el segundo subgrupo (Figura 2.3). Con respecto al yeso todas se encuentran insaturadas. La respuesta a la acción de las lluvias sobre los macizos kársticos, tanto de los caudales como de los contenidos iónicos de las aguas en las emergencias, es relativamente rápida al igual que su recuperación.

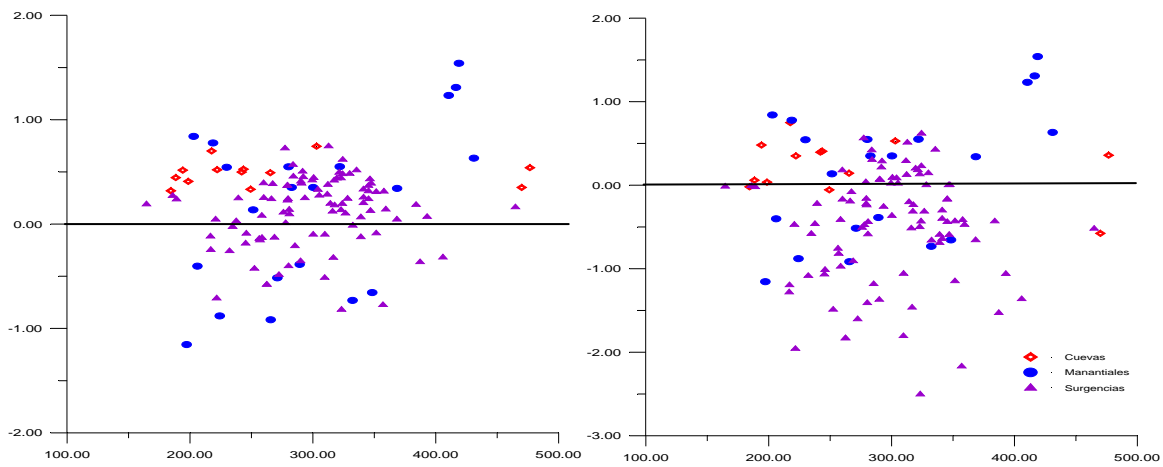


Figura 2.3. Valores de RSC y RSD en función del TDS. Flujos locales e intermedios que drenan calizas de la formación Guajaibón.

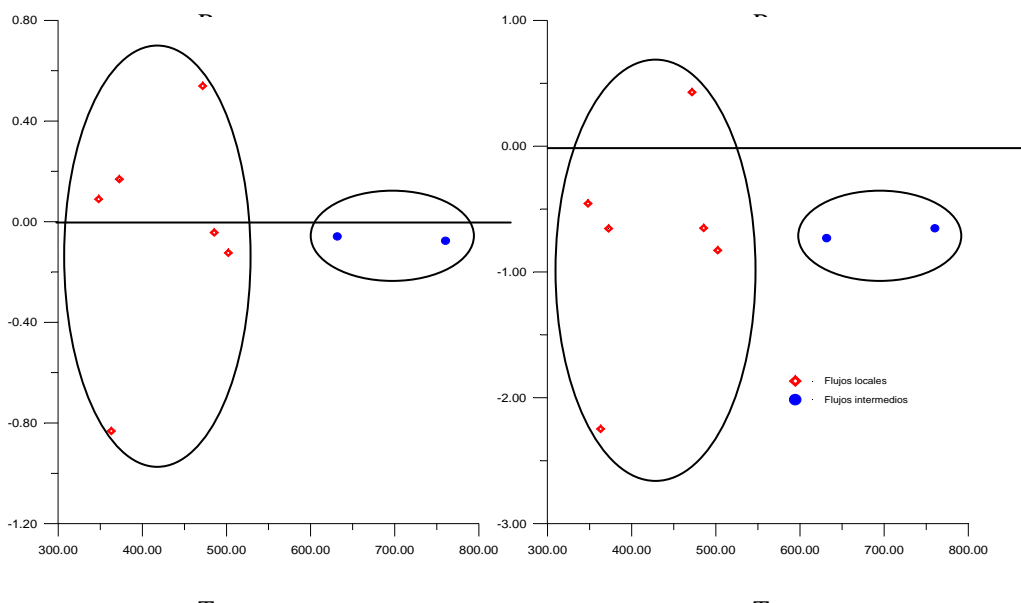


Figura 2.4. Valores de RSC y RSD en función de TDS. Flujos locales e intermedios que drenan calizas de la Fm. Sierra Azul e interactúan con sedimentos de la Fm. Cacarajícara.

Grupo 4. Está formado por flujos locales e intermedios que drenan acuíferos no confinados constituidos por calizas de la Fm. Sierra Azul y brechas y calcarenitas de la Fm. Cacarajícara. Las aguas más someras (flujos locales) son de temperatura fría ( $23.8 \pm 1.4$  °C), pH aproximadamente neutro ( $7.09 \pm 0.25$ ), pero presentan altos contenidos de  $\text{CO}_2$  ( $43.4 \pm 11.8$  mg/l). Este tipo de flujo posee bajo contenido de cloruro ( $23.8 \pm 1.4$  mg/l) y moderada concentración de iones disueltos (SST,  $492 \pm 143$  mg/l). Estas aguas, tal como se aprecia en la tabla 1, tienen potenciales redox negativos (Eh entre  $-63$  y  $-80$  mv) y altos contenidos de  $\text{O}_2$  disuelto ( $5.3 - 7.7$  mg/l). Los parámetros químico-físicos de las aguas más profundas que interactúan con los sedimentos de la Fm. Cacarajícara (flujos intermedios) son superiores a las de los flujos locales (Tabla 1). Las facies hidroquímicas presentes son:  $\text{HCO}_3 - \text{Ca}$ , en la parte superior y  $\text{HCO}_3 > \text{SO}_4 - \text{Ca} > \text{Na}$ , en la parte inferior del acuífero. Constituyen un grupo homogéneo con relaciones iónicas del mismo orden de la Fm. Guajaibón (Tabla 1). Se distinguen de las anteriores por presentar un relativamente alto contenido de  $\text{CO}_2$  y un pH más bajo. El comportamiento de los valores de RSC, RSD y RSY (Figura 2.4) es similar al del subgrupo de las emergencias kársticas de la Fm. Guajaibón.

Grupo 5. Está formado por flujos intermedios, los cuales drenan acuíferos no confinados constituidos por calizas de la Fm. Artemisa. Estas aguas tienen temperaturas frías ( $23.1 \pm 1.7$  °C), pH ligeramente neutro ( $7.44 \pm 0.49$ ), moderado contenido de  $\text{CO}_2$  ( $24.4 \pm 17.2$  mg/l), bajo contenido de  $\text{Cl}^-$  ( $17.9 \pm 4.4$  mg/l) y moderadas concentraciones de iones disueltos (SST,  $475 \pm 92$  mg/l). El Eh de estas aguas varía entre  $-50$  y  $-138.9$  mv y poseen altos contenidos de  $\text{O}_2$  disuelto ( $6.9$  a  $7.7$  mg/l). La facies hidroquímica es  $\text{HCO}_3 - \text{Ca}$  y las relaciones iónicas son similares entre sí (Tabla 2). Por lo general las aguas procedentes de manantiales (subgrupo 1) tienden a alcanzar el equilibrio químico con respecto a la calcita y la dolomita, mientras que las que emergen a través de grandes conductos (surgencias y resurgencias) suelen encontrarse sobresaturadas con respecto a dichos minerales (Figura 2.5). Este comportamiento diferente está relacionado con la mayor facilidad al escape del  $\text{CO}_2$  disuelto en el agua en el segundo caso. Con relación al yeso todas las aguas se encuentran insaturadas.

Grupo 6. Incluye flujos intermedios que drenan acuíferos no confinados desarrollados en calizas de la Fm. Artemisa. Estas aguas están asociadas a las fracturas de la falla Pinar, así como a las grietas relacionadas con fallas transversales a aquella. Las temperaturas de estas aguas son ocasionalmente más elevadas que las restantes aguas estudiadas ( $24.5 \pm 1.4$  °C), el pH se encuentra cercano a la neutralidad ( $7.15 \pm 0.21$ ), poseen relativamente altos contenidos de  $\text{CO}_2$  ( $57.8 \pm 30.4$  mg/l), y de cloruro ( $36.7 \pm 13.0$  mg/l), así como concentraciones relativamente más altas de SST ( $631 \pm 112$  mg/l) que las anteriores. Estas aguas presentan potenciales redox negativos ( $-235$  a  $-280$  mv), bajos contenidos de  $\text{O}_2$  disuelto ( $1.2 - 1.9$  mg/l) y relativamente altos contenidos de  $\text{H}_2\text{S}$  disuelto ( $5.4 - 10.0$  mg/l). La principal facies hidroquímica es  $\text{HCO}_3 - \text{Ca}$ .

Este grupo es parecido en sus relaciones iónicas y tipo hidroquímico a las aguas del grupo 5, salvo que la magnitud de Ca/Mg (Tabla 1) es ligeramente menor (indicativo de una mayor presencia o disolución de dolomita). Se diferencia de dicho grupo por presentar un mayor contenido de cloruro, del total de iones disueltos (TSS), así como por la presencia de  $\text{H}_2\text{S}$ . La temperatura invernal en estas agua varían entre  $23.5$  y  $25.6$  °C y el coeficiente de variación de la temperatura es del orden de  $0.8$  %. Estas características indican un mayor y más profundo recorrido subterráneo de estas aguas hasta su emergencia. Tienden a alcanzar el equilibrio con respecto a la calcita y la dolomita (Figura 2.6), pero se encuentran insaturadas con respecto al yeso.

Grupo 7. Está formado por flujos intermedios que drenan acuíferos confinados constituidos por materiales de varias litologías (mezcla), principalmente calizas de la Fm. Artemisa y rocas ultrabásicas de la Asociación Ofiolítica. Estas aguas presentan temperaturas moderadamente calientes ( $26.1 \pm 2.4$  °C), el pH varía desde neutro a alcalino ( $7.36 \pm 0.31$ ), generalmente altos contenidos de  $\text{CO}_2$  ( $32.1 \pm 12.3$  mg/l) y  $\text{H}_2\text{S}$  disueltos ( $26.1 - 196.9$  mg/l). Las concentraciones de  $\text{Cl}^-$  ( $24.0 \pm 1178$  mg/l) y de SST ( $720 \pm 251$  mg/l) son también relativamente altas. Estas aguas exhiben altos potenciales redox negativos ( $-238$  a  $-325$  mv) y bajos contenidos de  $\text{O}_2$  disuelto ( $1.2 - 2.7$  mg/l).

Su composición es de tipo  $\text{HCO}_3$ -Mixtas (Tabla 1), siendo los cationes más relevantes:  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{Mg}^{2+}$  en proporciones dependientes del aporte diferenciado de las areniscas, las calizas y las serpentinitas respectivamente. En las emergencias tienden a encontrarse saturadas con respecto a la calcita y la dolomita (Figura 2.6) e insaturadas con relación al yeso.

Grupo 8. Está representado por flujos intermedios que drenan esquistos, areniscas y calizas de la Fm. San Cayetano. Estas aguas poseen relativamente altas temperaturas ( $27.6 \pm 2.9$  °C), pH alcalino ( $8.12 \pm 0.7$ ), relativamente bajo contenido de  $\text{CO}_2$  ( $18.5 \pm 19.5$  mg/l) y altas concentraciones de  $\text{H}_2\text{S}$  ( $26.1 - 196.9$  mg/l). Los contenidos de  $\text{Cl}^-$  ( $116.9 \pm 70.1$  mg/l) y SST ( $1260 \pm 398$  mg/l) de estas aguas son más altos que los de las aguas anteriormente descritas. Presentan muy altos valores negativos de potenciales redox ( $-238$  a  $-325$  mv) y bajos contenidos de  $\text{O}_2$  disuelto ( $1.2 - 2.7$  mg/l). Las facies hidroquímicas más comunes son  $\text{HCO}_3 - \text{Na}$  y  $\text{HCO}_3 - \text{Na} > \text{Cl}$ . Debido a su recorrido relativamente profundo, estas aguas extraen el  $\text{Na}^+$  de los aluminosilicatos en virtud de las relativamente elevadas temperaturas alcanzadas en su descenso. En forma similar también adquieren altos contenidos de  $\text{SiO}_2$ , tal como se aprecia en la tabla 1. Al igual que en el caso anterior, las aguas tienden a la saturación con respecto a la calcita y la dolomita (Figura 2.6) y a la insaturación con relación al yeso, lo cual es indicativo de un efecto poco acentuado del ciclo hidrológico sobre las mismas.

Grupo 9. Esta integrado por flujos intermedios y regionales que drenan acuíferos confinados constituidos por calizas de la Fm. Artemisa e interactúan con los materiales de los depósitos confinantes, compuestos principalmente por esquistos y areniscas de la Fm. San Cayetano, así como con rocas ultrabásicas de la Asociación Ofiolítica. Estos flujos están asociados a las fallas Pinar y San Diego. Las aguas poseen relativamente altas temperaturas ( $38.9 \pm 6.6$  °C) y sus pH se encuentran cercanos a la neutralidad ( $7.22 \pm 0.27$ ), el contenido de gases disueltos es relativamente alto ( $\text{CO}_2$ ,  $43.8 \pm 12.9$  mg/l; y  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $7.9 - 38.5$  mg/l). La concentración de  $\text{Cl}^-$  disuelto es alto ( $37.7 \pm 11.7$  mg/l), y los contenidos de  $\text{SO}_4^{2-}$  ( $1306.2 \pm 427.4$  mg/l) y SST disueltos son los mayores encontrados ( $1356 \pm 571$  mg/l) El valor de Eh es altamente negativo ( $-254$  a  $-325$  mv) y el  $\text{O}_2$  disuelto es bajo ( $2.1 - 2.7$  mg/l). Las principales facies hidroquímicas son  $\text{SO}_4^{2-} - \text{Ca}$ ,  $\text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3 - \text{Ca}$  y  $\text{SO}_4^{2-} - \text{Ca} > \text{Na}$ .

Este grupo es bastante homogéneo, lo cual se aprecia en la poca variación de sus relaciones iónicas (Tabla 1). En su recorrido alcanzan grandes profundidades, lo cual se evidencia por las relativamente altas temperaturas, así como los elevados contenidos de cloruro, sulfato, magnesio, sodio y potasio.

Las facies hidroquímicas presentes son:  $\text{SO}_4\text{-Ca}$ ,  $\text{SO}_4 > \text{HCO}_3\text{-Ca}$  y  $\text{SO}_4\text{-Ca} > \text{Na}$ , y sus relaciones iónicas se corresponden con esta composición (tabla 5). Por lo general se encuentran saturadas con respecto a la calcita y la dolomita (Figura 2.7) y muy cerca de la saturación con respecto al yeso.

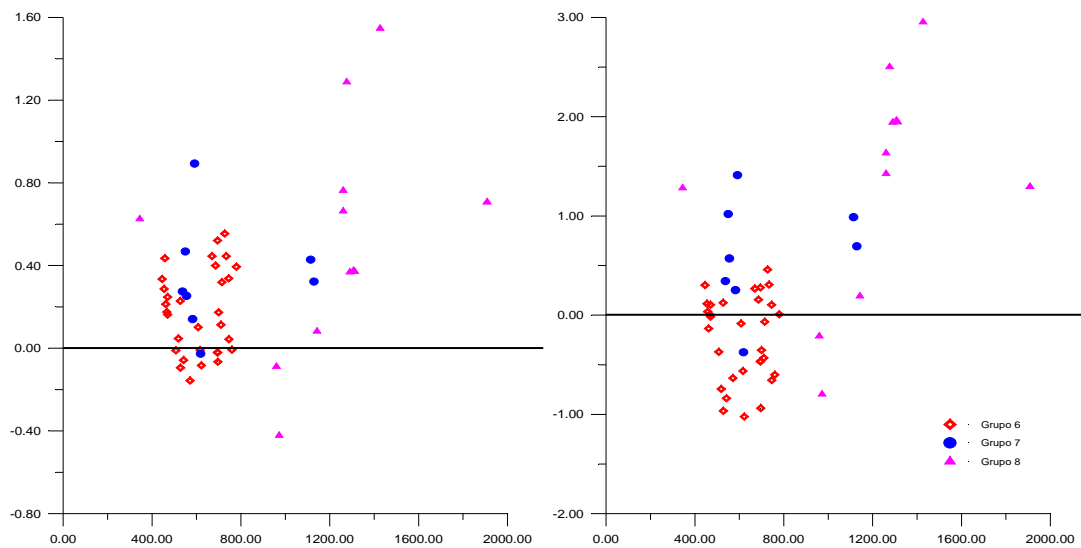


Figura 2.5. Valores de RSC y RSD en función del TDS. Flujos locales que drenan calizas de la Fm. Artemisa.



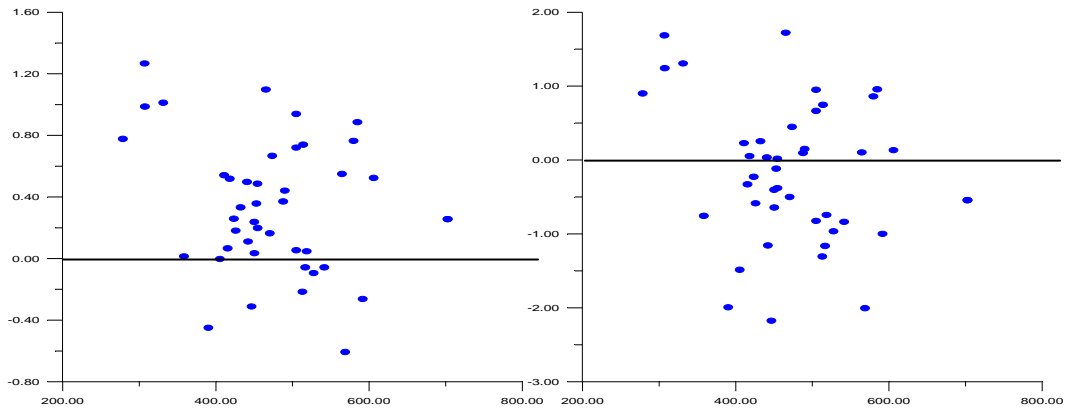


Figura 2.6. Valores de RSC y RSD en función del TDS. Flujos intermedios que drenan calizas de la Fm. Artemisa (Grupo 6); sedimentos constituidos por mezclas de rocas (grupo 7) y areniscas de la Fm. San Cayetano (Grupo 8).

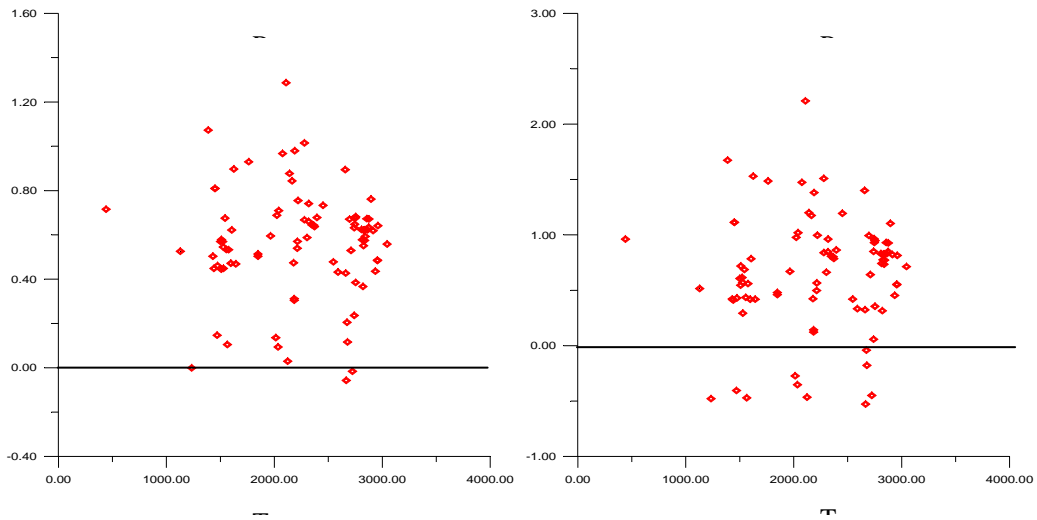


Figura 2.7. Valores de RSC y RSD en función del TDS. Flujos intermedios y regionales que drenan calizas de la Fm. Artemisa e interactúan con otras litologías.

## Origen de la composición química del sistema de flujo

El control litológico y estructural sobre las aguas de la Sierra del Rosario puede inferirse a partir de los resultados discutidos en la primera parte de esta serie. Además de las regularidades descritas con anterioridad, de su análisis se puede establecer el siguiente comportamiento:

La composición química de los flujos locales e intermedios que discurren por los macizos constituidos por los esquistos y areniscas de las formaciones Manacas y San Cayetano (grupo 1), los cuales poseen facies hidroquímicas del tipo bicarbonatadas cálcicas sódicas y bicarbonatadas sódicas respectivamente, con poco contenido de minerales disueltos, se origina principalmente por intemperismo de plagioclasa (anorthita, albita, microclino) y serpentinita a expensas de  $\text{CO}_2$  de carácter biogénico. Si bien los dos primeros minerales son más solubles a bajas temperaturas y suelen estar bien distribuidos en los sedimentos de cobertura, las areniscas constitutivas de las referidas formaciones son ricas en aluminosilicatos. Otros procesos, tales como oxidación de pirita, disolución de cuarzo e intercambio iónico también contribuyen en el proceso de adquisición de la composición química de esta agua (Tabla 2.1).

El origen de la composición química de las aguas del grupo 2 ( $\text{HCO}_3\text{-Mg}$ ), que drenan los macizos ultrabásicos se explica mediante procesos de disolución de serpentinita, oxidación de pirita y consumo de  $\text{CO}_2$  biogénico y disolución de  $\text{SiO}_2$  (Tabla 2.1).

Los procesos geoquímicos que originan la composición química de flujos locales e intermedios que drenan en la zona vadosa del sistema kástico del macizo del Pan de Guajaibón (grupo 3), son los siguientes: disolución de calcita y dolomita, oxidación de pirita, consumo de  $\text{CO}_2$  en la zona del suelo, disolución de  $\text{SiO}_2$  e intercambio iónico (Tabla 2.1).

Las aguas del grupo 4. de tipo bicarbonatada cálcica, que discurren someramente por las calizas masivas de la Fm. Sierra Azul, se originan mediante procesos geoquímicos similares a las del grupo anterior (Tabla 2,1).

**Tabla 2.1. Transferencia de masas (milimoles/l) originada por disolución o reacción química (+), o por precipitación o consumo (-) en los procesos geoquímicos que tienen lugar**

**mediante procesos de interacción lluvia – roca (flujos locales e intermedios) en la Sierra del Rosario.**

Proceso geoquímico	1	2	3	4	5	6	7	8
Halita							0.23	0.40
Calcita	0.16	1.04		0.75	2.38	1.24	1.75	1.99
Dolomita	0.12	0.45		0.08		0.13	0.34	0.42
Serpentina			1.71					
Albita	0.13	0.82					0.23	2.05
Microclino								0.08
Pirita		0.11	0.12	0.06	0.08	0.11	0.27	1.43
SO <sub>4</sub> – H <sub>2</sub> S								0.24
CO <sub>2</sub>	-0.59	-2.51	-3.18	-0.75	-2.33	-1.39	-3.00	-3.49

Línea de flujo Lluvia: 1) M. Arroyo La Sed (fc=2.31); 2) M. Floresceína (fc=2.81); 3) M. Cajalbana (fc=2.81); 4) Cueva Lechuza (fc=2.81); 5) M. Arroyo Conuco de la Bija (fc=3.62); 6) Surgencia Ancón (fc=2.69); 7) M. Cacarajícara NS (fc=2.88); 8) M. Cacarajícara S (fc=2.88).

La composición química de los flujos locales que drenan las calizas estratificadas de la Fm. Artemisa (grupo 5), también de tipo HCO<sub>3</sub>-Ca, tiene su origen mediante procesos geoquímicos similares al de las restantes aguas carbonatadas (Tabla 2.2).

La composición química de las aguas del grupo 6 (flujos intermedios que drenan las calizas de la Fm. Artemisa), se explica mediante los procesos de disolución de halita, calcita y dolomita, oxidación de pirita con reducción parcial de sulfato, así como a los procesos de disolución de sílice y consumo de CO<sub>2</sub> (Tabla 2.2). Como el proceso de oxidación de pirita va acompañado de la generación de este gas, parte de la calcita disuelta pudiera formarse por consumo de CO<sub>2</sub> de tipo no biogénico.

La ausencia de yeso en los sedimentos tanto de las formaciones carbonatadas como no carbonatadas de la Sierra del Rosario, al menos hasta donde alcanzan las aguas, sugiere que la fuente de sulfato la constituyen las piritas, las que al reducirse originan el H<sub>2</sub>S. El relativamente

alto contenido de este gas en las aguas pudiera deberse a que las mismas alcanzan la falla Pinar donde interactúan con los esquistos y areniscas de la Fm. San Cayetano antes de surgir por los manantiales. Como se hace referencia en la literatura, los esquistos son ricos en piritas (Appelo y Potma, 1993). Sin embargo, las propias calizas de la Fm. Artemisa son fétidas (huelen a sulfhídrico cuando se les tritura) y pueden tener H<sub>2</sub>S ocluido, tal como fue demostrado por Émbil (1947).

El grupo 7 lo integran aguas del tipo bicarbonatada mixtas, las cuales drenan diferentes litologías (calizas, rocas ultrabásicas, así como esquistos areniscas). El origen de la composición química de estas aguas se muestra en la tabla 2.2. Intervienen procesos de disolución de halita, calcita y dolomita o serpentinita (ambos minerales aportan iguales proporciones de HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> y Mg<sup>2+</sup>) en el intemperismo de las rocas constituidas por los correspondientes minerales. También se producen procesos de oxidación de piritita con reducción parcial de sulfato.

El origen de las aguas del grupo 8, constituido por flujos intermedios que drena esquistos y areniscas de las formaciones Manacas o San Cayetano, está relacionado con los procesos de disolución incongruente de plagioclasas (albita, anorthita, microclino) y sílice, acompañados de los procesos de oxidación de piritita con reducción de parte del sulfato (Tabla 2.2).

El grupo 9 lo integran flujos regionales que drenan calizas de la Fm. Artemisa y que en profundidad interactúan con sedimentos de la Fm. San Cayetano. Originan aguas de tipos sulfatadas bicarbonatadas cálcicas, sulfatadas cálcicas y sulfatadas cálcicas sódicas. La composición química de las aguas del tipo sulfatadas cálcicas altamente mineralizadas se puede explicar mediante procesos de disolución congruente de halita, calcita, dolomita (o serpentinita) y sílice, disolución incongruente de plagioclasas (albita, anorthita, microclino), así como oxidación de piritita y reducción de sulfato (Tabla 2.3). Las aguas del tipo SO<sub>4</sub> >HCO<sub>3</sub>-Ca y las del tipo SO<sub>4</sub>-Ca con más bajo contenido de minerales disueltos puede explicarse, aplicando modelos de balance de masas y mezcla de aguas, mediante similares procesos previa mezcla de miembros extremos de los tipos HCO<sub>3</sub>-Ca y HCO<sub>3</sub>-Na en diferentes proporciones (Tabla 2.2).

**Tabla 2.2. Transferencia de masas (milimoles/l) originada por disolución o reacción química (+), o por precipitación o consumo (-) en los procesos geoquímicos que tienen lugar mediante procesos de interacción lluvia – roca (flujos locales e intermedios) en la Sierra del Rosario.**

Proceso geoquímico	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Halita		0.21	0.77	0.17	0.11		1.17	6.58	0.77
Calcita	1.89	2.56	2.32	1.67	2.36		0.87	1.19	14.27
Dolomita	0.14	0.23	0.49						
Serpentina				1.10	2.09		0.69	1.04	2.54
Albita	0.30	0.30	0.52	0.78	4.18	3.09	7.58	11.32	5.54
Microclino					0.15		0.31	0.64	0.22
Pirita	0.39	0.47	0.46	0.94	6.10	0.41	1.47	3.12	19.16
SO <sub>4</sub> – H <sub>2</sub> S			0.16	0.77	5.79		0.64	2.56	0.87
CO <sub>2</sub>	-2.00	-2.99	-4.50	-3.56	0.13	2.32	-8.19	-10.56	1.91

Línea de flujo Lluvia: M. Mil Cumbres (fc=3.00); 10) Pozo P3 90m (fc=2.88); 11) M. Pedernales (fc=2.88); 12) M. Soroa (fc=2.88); 13) Pozo El Sitio (fc=2.88); 14) Pozo P3 40 m (fc=3.00); 15) M. Mil Cumbres S (fc=2.88); 16) M. Rancho Mar (fc=2.88); 17) Pozo P1 (fc=2.88).

A partir de la información brindada en las tablas 2.1-2.3 se puede establecer el modelo de evolución química de las aguas de la Sierra del Rosario mediante diagramas hidroquímicos de Stiff (figura 3).

**Tabla 2.3. Transferencia de masas (milimoles/l) originada por disolución o reacción química (+), o por precipitación o consumo (-) en los procesos geoquímicos que tienen lugar mediante procesos de interacción agua subterránea – roca y mezcla de aguas (flujos regionales y aguas termales) en la Sierra del Rosario.**

Proceso geoquímico	1	2	3	4	5
Halita	0.40	0.30	0.31	-0.39	-1.04
Calcita	-0.50	-2.88	-0.25	0.36	-1.99
Dolomita	0.36	-0.12	0.33	0.22	0.80
Albita		-0.11	-4.36	-7.41	2.30
Microclino	0.03		-0.12	-0.24	0.04
Pirita	1.36				2.19
SO <sub>4</sub> – H <sub>2</sub> S	-1.36	-3.26	-0.12	-0.71	-0.89

H <sub>2</sub> S - S			0.53	1.37	1.49
CO <sub>2</sub>	2.01	2.97	0.64		3.76
CO <sub>2</sub> - HCO <sub>3</sub>			3.14		

Línea de flujo: 1) Pozo 3 (40 m) (26.8 %) + Pozo P3 (90 m) (73.2 %) = Pozo P13; 2) Pozo P3 (90 m) (83,8 %) + Pozo P1 (16.2 %) = M. El Templado; 3) Pozo P3 (90 m) (35.9 %) + Pozo P1 (64.1 %) = M. La Gallina; 4) Pozo P4 (103 – 288 m) (35.3 %) + Pozo P1 (64.7 %) = M. M1 Bermejales; 5) Pozo P4 (100 m) (51.9 %) + Pozo P4 (222 – 228 m) = Pozo P1 (145 – 195 m).

### Temperatura de las aguas

La temperatura del agua subterránea y los resultados de los análisis químicos de las muestras, cuando se relacionan con el cuadro geológico, sugiere un control de la litología y de la estructura geológica sobre la composición física y química observada. La temperatura de las aguas subterráneas ha sido usada como un indicador del tipo de flujo (Toth, 1999; Carrillo-Rivera et al., 1986) lo cual ha permitido asociar las aguas subterráneas con temperaturas anormalmente altas con flujos regionales, y las bajas temperaturas con flujos de naturaleza local.

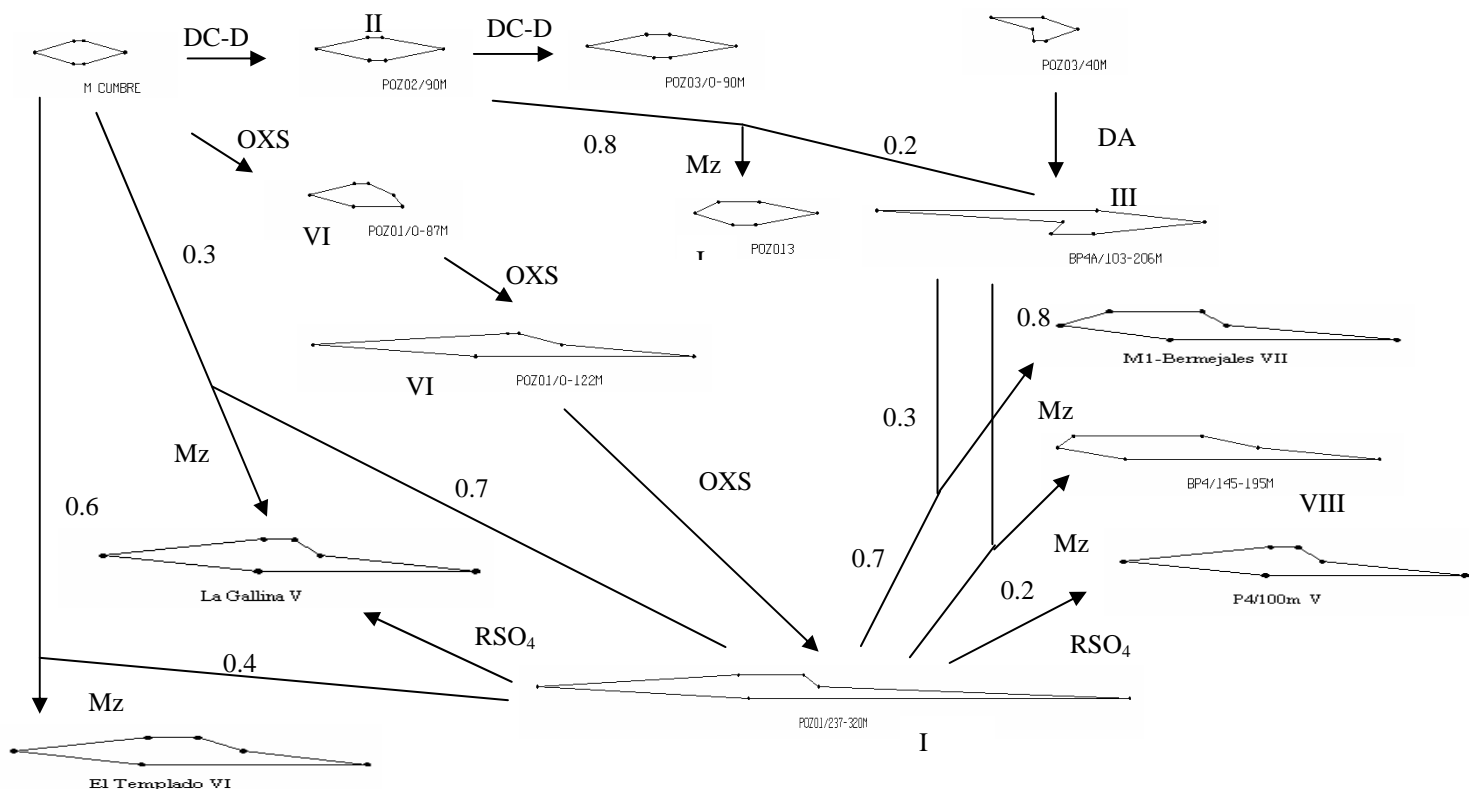


Figura 3. Procesos hidrogeoquímicos representados mediante Diagramas de Stiff (San Diego de los Baños-Bermejales).

### Leyenda

DC-D: Disolución de calcita y dolomita; DA: Disolución de albita; OXS: Oxidación de piritas; RSO<sub>4</sub>: Reducción de sulfato; Patrones: (números romanos); I: Agua SO<sub>4</sub>-Ca; II: Agua HCO<sub>3</sub>-Ca; III: Agua HCO<sub>3</sub>>Cl-Na; IV: Agua HCO<sub>3</sub>-Ca>Na; V: Agua SO<sub>4</sub>-Ca de mayor mineralización; VI: Agua SO<sub>4</sub>>HCO<sub>3</sub>-Ca; VII: Agua SO<sub>4</sub>-Ca>Na; VIII: Agua SO<sub>4</sub>>HCO<sub>3</sub>-Ca>Na. Los números decimales representan la proporción en que ocurren las mezclas.

La temperatura del agua depende tanto de las condiciones climáticas como geotermales. Desde la perspectiva del movimiento del agua subterránea, los sistemas kársticos en Cuba son muy dinámicos en términos de tiempo de recorrido, lo cual implica un flujo rápido y baja capacidad de almacenamiento. Este se refleja localmente por la producción de contrastantes cambios en la temperatura estacional de este tipo de fuente (grupo 3). Se observa así temperaturas en las aguas entre 18 a 24.2 °C entre el invierno y el verano respectivamente en las aguas que drenan las calizas de la Fm. Guajaibón. Esta diferencia de temperatura es más drástica en las aguas que drenan los sedimentos de la Fm. Manacas, donde se han reportado valores desde 17.8 hasta 28.4 °C (Fagundo et al., 1993), lo cual sugiere un menor tiempo de residencia y de capacidad de almacenamiento que la Formación Guajaibón. Estas diferencias están soportadas por los caudales de los manantiales mayores en la Fm. Guajaibón (del orden de 50 a 450 l/s) que en la Fm. Manacas (aproximadamente de 1 l/s). Se considera que estas aguas pertenecen a flujos de naturaleza local, lo cual parece confirmarse por su posición topográfica y características geológicas.

Un comportamiento similar se observa en las aguas someras que drenan los sedimentos ultrabásicos (grupo 2) y el resto de las formaciones calcáreas (grupos 4 y 5). Las que alcanzan mayores profundidades en su recorrido subterráneo presentan, por lo general, mayores temperaturas en las emergencias que las aguas subterráneas someras. Sin embargo, en las aguas que tienen un recorrido intermedio (grupo 6), no se distingue una dependencia marcada de la temperatura con la profundidad, por lo que es más útil utilizar la temperatura media de los meses más fríos en Cuba (noviembre-marzo) que la temperatura absoluta para inferir el carácter más profundo del agua (Fagundo et al, 1997). Otro método complementario consiste en tomar el valor del coeficiente de variación de la temperatura (tabla 3), el cual es más pequeño en aquellas

aguas que alcanzan mayores profundidades y por tanto se encuentran menos sometidas a la acción del ciclo hidrológico. Las aguas más someras por el contrario, poseen mayor fluctuación estacional de su temperatura, lo cual se refleja en un mayor valor del coeficiente de variación de la temperatura.

### **Mineralización**

La mineralización de las aguas en las emergencias depende del tipo de litología drenada, del tiempo de recorrido subterráneo del flujo, de la profundidad que alcanza el mismo, del contenido de CO<sub>2</sub> disponible en la zona el suelo y las condiciones en que el mismo es tomado por las aguas procedentes de las precipitaciones durante su infiltración (condiciones de sistema cerrado, abierto o mixto). Las aguas más someras presentan una variación estacional del coeficiente de variación (C.V.) de la mineralización (total de sólidos solubles), tal como se muestra en la tabla 2. Sin embargo, un valor de C.V. TSS relativamente alto puede obtenerse en aguas profundas que han experimentado mezcla con aguas someras en su ascenso o que al brotar a la superficie han sufrido cambios.

Por lo general las aguas subterráneas en las emergencias pierden parte de los gases disueltos que poseen y experimentan cambios de pH y potencial redox, por lo que son posibles procesos de recombinación iónica que originan precipitación de minerales y disminución del contenido de iones disueltos.



**Tabla 3. Indicadores de la variación estacional de la temperatura y de los sólidos disueltos totales (tds) en las aguas de la sierra del rosario**

No	Grupo	Temperatura						TDS					
		N	Tm	CV <sub>Tm</sub>	N	Tmi	CV <sub>tmi</sub>	N	TDS	CV <sub>TDS</sub>	N	TDSi	CV <sub>TDSi</sub>
1	1	4	25.5	8.7	1	25.0		4	134	14.6	1	136	
2	1	28	23.3	9.0	13	22.0	7.6	28	407	26.4	13	389	32.6
3	2	6	22.7	5.8	4	22.1	3.4	6	381	17.4	4	396	17.0
4	2	4	23.2	3.2	3	23.0	2.8	4	355	11.0	3	355	
5	3a	9	21.8	1.8	5	21.7	1.6	9					
6	3a	4	22.2	0.8	4	22.2	0.8	4	280	14.4	4	280	14.4
7	3a	4	22.3	2.6	4	22.3	2.6	4	283	5.3	4	283	5.3
8	3b	4	22.2	5.4	4	22.2	5.4	4	358	12.8	4	358	12.8
9	3c	39	22.6	1.9	18	22.3	1.3	39	271	14.0	18	274	10.1
10	3c	38	22.7	1.1	17	22.6	1.5	38	305	13.1	17	294	13.6
11	3c	10	23.2	3.2	6	22.9	2.1	10	345	9.6	6	335	11.3
12	3c	5	22.7	1.5	5	22.7	1.5	5	321	4.9	5	321	4.9
13	5a	18	22.7	0.9	9	22.6	0.7	18	438	7.7	9	429	8.4
14	6	5	24.8	2.6	3	24.5		5	739	5.3	3	745	
15	6	5	22.4	1.6	3	24.0		5	68.2	6.8	3	686	
16	6	9	25.3	5.5	2	24.0		9	473	5.6	2	450	
17	8	4	30.3	1.3	3	30.1		4	1199	4.2	3	1199	
18	9	5	31.3	0.5	1	31.5		5	1518	5.5	1	1528	
19	9	8	36.0	1.0	2	36.1		8	1542		2	1542	
20	9	5	35.8	1.5	0			5	2217	3.0	0		
21	9	9	31.5	1.3	1	32.3		9	2381	10.4	1	2674	
22	9	9	30.0	1.9	9	30.0	1.9	9	2297	3.7	9	2297	3.7
23	9	30	45.8	0.5	0			30	2811	3.2	0		
24	9	5	45.6	1.0	0			5	1526	5.5	0		

1) Manantial La Sed, 2) Sumidero Mamey, 3) Manantial Cajálbana 1, 4) Manantial Cajálbana 2, 5) Cueva Lechuza, 6) Cueva Mamey, 7) Cueva Ancón, 8) Cueva Mamey, 9) Manantial Mamey, 10) Surgencia Ancón, 11) Resurgencia Ancón 2, 12) Manantial Fernando, 13) Manantial Mil Cumbres, 14) Manantial La Pastora, 15) Pozo Pedernales, 16) Pozo El Brocal, 17) Pozo P 4, 18) Manantial El Tigre, 19) Manantial El Templado, 20) Manantial La Gallina, 21) Manantial M1, 22) Pozo P 12, 23) Pozo P 1, 24) pozo P 19.

Tm: Temperatura media anual (°C); Tmi: Temperatura media anual de los meses más fríos (°C); TDS: valor medio de los sólidos disueltos totales (mg/l); TDSi: valor medio de los sólidos disueltos totales en los meses más fríos (mg/l); C.V.: coeficiente de variación (%).

En la tabla 4, se muestra cómo varía la temperatura y algunos contenidos iónicos en pozos y manantiales de la región de San Diego de los Baños – Los Bermejales (Peláez et al., 1990).

**Tabla 4. Variación de las propiedades químico-físicas de las aguas del pozo P 1, San Diego de los Baños con la profundidad.**

Intervalo de profundidad (m)	T (°C)	Cl <sup>-</sup> (mg-l)	CO <sub>2</sub> (mg-l)	H <sub>2</sub> S (mg-l)	SiO <sub>2</sub> (mg-l)	TDS (mg-l)
0 - 87	26.0	14	10.0	0.0	14.0	354
80 - 120	31.0	21	22.0	9.0	18.1	1376
120 - 200	36.2	21	22.0	9.0	20.0	1870
240 - 280	44.0	29	27.0	28.5	24.0	2955
237 - 320	46.0	33	38.0	39.7	26.7	3331

Los manantiales que emergen en este sitio poseen además apreciables contenidos de Cl, F, Li, Sr y Rn (Tabla 5), lo cual sugiere que corresponden a flujos de largo y más profundo recorrido subterráneo, mayor en las aguas que emergen por San Diego de los Baños que las que lo hacen por Los Bermejales. Esta apreciación es coherente con los resultados obtenidos usando geotermómetros químicos (Fagundo et al, 2001).

**Tabla 5. Parámetros químico físicos de los principales manantiales y pozos del sector hidrogeológico San Diego de los Baños – Los Bermejales.**

No	T (°C)	Eh (mv)	O <sub>2</sub> (mg/l)	CO <sub>2</sub> (mg/l)	H <sub>2</sub> S (mg/l)	SiO <sub>2</sub> (mg/l)	Cl <sup>-</sup> (mg/l)	F (mg/l)	Li (mg/l)	Sr (mg/l)	Rn (nC/l)
1	31.5	-317	2.1	44.9	46.8	24.8	34.9				0.23
2	34.5	-254	2.7	46.2	9.5	19.1	33.5	1.1	0.013	1.49	1.04
3	37.4	-325	2.7	46.2	17.3	22.6	40.5	1.1	0.022	2.38	1.25
4	45.8			39.3	27.8	18.4	43.6				1.25

1) Manantial M1, 2) Manantial El Templado, 3) Manantial La Gallina, 4) Pozo 1.

## **Sistema de flujos y composición química de las aguas**

Partiendo de la composición química de las lluvias locales y tomando en consideración los grupos definidos anteriormente sobre la base de sus propiedades químico-físicas y su relación con las características litológicas y estructurales del medio drenado, se pueden establecer 7 líneas de flujo:

1. Lluvia – Flujos locales e intermedios que drenan sedimentos compuestos de esquistos y areniscas de la Fm. Mancas.
2. Lluvia – Flujos locales e intermedios que drenan sedimentos constituidos por rocas ultrabásicas de la Asociación Ofiolítica.
3. Lluvia – Flujos locales e intermedios que drenan sedimentos carbonatados de la Fm. Guajaibón.
4. Lluvia – Flujos locales e intermedios que drenan sedimentos carbonatados de la Fm. Sierra Azul e interactúan con sedimentos de la Fm. Cacarajícara.
5. Lluvia – Flujos locales e intermedios que drenan sedimentos de diferente constitución (mezclas): calizas, esquistos y areniscas y rocas ultrabásicas.
6. Lluvia – Flujos locales e intermedios que drenan esquistos y areniscas de la Fm. San Cayetano.
7. Lluvia – Flujos locales, intermedios y regionales que drenan calizas de la Fm. Artemisa y en su trayectoria final interactúan con rocas ultrabásicas (Asociación Ofiolítica) y esquistos y areniscas (Fm. San Cayetano).

La primera línea de flujo de lugar a aguas frías del tipo bicarbonatadas cálcicas sódicas desde mediana a moderada mineralización en dependencia de la naturaleza del flujo. La relación entre sus iones y el TDS puede ser evaluada a partir de la matriz de correlación de los datos conjuntos del grupo 1 y la lluvia (Tabla 6.1). Las correlaciones más significativas ( $r > 0.84$ ,  $N = 39$ ) se obtienen entre  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  y TDS, y las menos significativas se obtienen con la temperatura (T).

La segunda línea de flujo que da lugar a aguas del tipo bicarbonatadas magnesianas frías. Sus componentes químicos están relacionados entre sí tal como se muestra en la tabla 6.2. Las correlaciones más significativas ( $r > 0.89$ ,  $N = 17$ ) en este caso son entre  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y TDS y no se obtienen buenas correlaciones con T.

La tercera línea de flujo rinde aguas del tipo bicarbonatadas cálcicas frías. La matriz de correlación de datos que se presenta en la tabla 6.3, indica  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y TDS correlacionan bien entre sí ( $r > 0.90$ ,  $N = 133$ ), mientras que, al igual que en los casos anteriores, son malas las correlaciones con T.

La cuarta línea de flujo, que da lugar también a aguas del tipo Ca -  $\text{HCO}_3^-$ , puede ser también caracterizada a partir de la correspondiente matriz de correlación de datos (Tabla 6.4). Las correlaciones más significativas ( $r > 0.90$ ,  $N = 10$ ) se obtienen entre  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ , TDS y  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{Na}^+$  y  $\text{Cl}^-$ . A pesar de que las correlaciones con T no son significativas, si se obtienen buenas correlaciones si sólo se toman las temperaturas de los meses más fríos (desde noviembre a marzo). En este caso correlacionan significativamente con la temperatura ( $r = 0.93$ ,  $N = 7$ ):  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y TDS. Estos resultados indican que las aguas que emergen por los manantiales relacionados con la Fm. Cacarájicara, corresponden al drenaje más profundo del sistema kárstico de Sierra Azul. Si también se incluyen en la matriz los datos de las temperaturas (meses más fríos) de las aguas del grupo 3, se obtiene un resultado similar al anterior, por lo que pudiera inferirse que parte de las aguas que drenan el macizo del Pan de Guajabón también aportan al drenaje profundo del sistema Sierra Azul.

La quinta línea de flujo que da lugar a aguas bicarbonatadas mixtas ligeramente templadas ( $\text{Ca} > \text{Na} - \text{HCO}_3$ ;  $\text{Ca} > \text{Na} - \text{HCO}_3$ ;  $\text{Ca} > \text{Mg} > \text{Na} - \text{HCO}_3$ ) es caracterizada mediante la matriz de correlación de datos que aparece en la tabla 6.5. La correlación más significativa ( $r > 0.90$ ,  $N = 11$ ) se obtiene entre  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  y TDS. Con respecto a la temperatura, correlacionan en forma altamente significativa ( $r > 0.67$ ,  $N = 11$ ) el ion  $\text{HCO}_3^-$  y de manera significativa ( $r > 0.60$ ,  $N = 11$ ), los iones  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y el TDS, lo cual es indicativo del carácter controlador de la profundidad en este tipo de agua.

La sexta línea de flujo rinde aguas del tipo bicarbonatadas sódicas. Las correlaciones más significativas ( $r > 0.90$ ,  $N = 14$ ) se obtienen entre  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  y TDS (Tabla 6.6). Con respecto a la temperatura la mayor correlación ( $r > 0.76$ ,  $N = 14$ ) se obtiene con el  $\text{Na}^+$ , aunque si se consideran sólo las temperaturas de los meses más fríos, se obtienen buenas correlaciones ( $r > 0.84$ ,  $N = 7$ ) además con  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  y TDS. Estas aguas alcanzan relativamente altas temperaturas con la profundidad, donde se disuelven mayores proporciones  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{SiO}_2$ .

La séptima línea de flujo da lugar en su recorrido subterráneo a aguas de los tipos  $\text{Ca} - \text{HCO}_3$ ,  $\text{Ca} - \text{HCO}_3$ · sulfhídrica,  $\text{Ca} - \text{SO}_4 > \text{HCO}_3$ ,  $\text{Ca} - \text{SO}_4$  y  $\text{Ca} > \text{Na} - \text{SO}_4$ . La matriz de correlación de datos correspondiente (Tabla 6.7) muestra que las mayores correlaciones ( $r > 0.90$ ,  $N = 155$ ) se obtienen entre  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y TDS, aunque también se obtienen buenas correlaciones ( $r > 0.80$ ,  $N = 155$ ) entre  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Na}^+$  y TDS. Las correlaciones con la temperatura son altamente significativas ( $r > 0.80$ ,  $N = 155$ ) con  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y TDS. Entre el  $\text{HCO}_3^-$  y el  $\text{SO}_4^{2-}$  no hay buena correlación y coeficiente de correlación correspondiente tiene signo negativo, indicando que mientras el segundo ion se incrementa el primero decrece. De este comportamiento se infiere que, en esta línea de flujo, con la profundidad las aguas van pasando de bicarbonatadas cálcicas a sulfatadas cálcicas.

Del análisis global de los resultados puede establecerse que la relación entre el ion  $\text{Ca}^{2+}$  y el TDS puede ser utilizada como indicador de la evolución de las aguas estudiadas a través de las diferentes líneas de flujo, desde las partes más someras de los diferentes tipos de acuíferos hasta las partes más profundas (donde son mayores la temperatura y el contenido gases y de iones

disueltos). En la figura 4 se muestran las correspondientes tendencias. Como puede apreciarse, la mayor contribución del ion calcio a la mineralización total del agua ocurre en la línea de flujo 7 (Fm. Artemisa - Fm. San Cayetano) y en va disminuyendo esta contribución en el siguiente orden de líneas de flujos: 3 (Fm. Guajaibón), 4 (Fm. Sierra Azul Fm. Cacarajícara), 1 (Fm. Manacas), 5 (Mezcla), 6 (Fm. San Cayetano) y 2 (Asociación Ofiolítica).

**Tabla 6.1. Matriz de correlación. Línea de flujo: lluvia – Fm. Manacas (grupo 1).**

N = 39	T	Cl	HCO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub>	Ca	Mg	Na	TDS
T	1	0.12	-0.07	0.01	-0.05	-0.10	0.07	-0.06
Cl		1	0.84	0.29	0.83	0.79	0.79	0.85
HCO <sub>3</sub>			1	0.38	0.96	0.84	0.91	0.92
SO <sub>4</sub>				1	0.83	0.22	0.51	0.44
Ca					1	0.72	0.86	0.97
Mg						1	0.71	0.83
Na							1	0.92
TDS								1

**Tabla 6.2. Matriz de correlación. Línea de flujo: lluvia – Asociación Ofiolítica (grupo 2).**

N = 39	T	Cl	HCO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub>	Ca	Mg	Na	TDS
T	1	0.36	0.31	0.05	-0.15	0.37	-0.01	0.30
Cl		1	0.90	0.15	-0.00	0.92	0.98	0.89
HCO <sub>3</sub>			1	0.32	-0.02	0.99	0.48	1.00
SO <sub>4</sub>				1	0.10	0.33	0.73	0.39
Ca					1	-0.07	0.40	0.00
Mg						1	0.42	0.99
Na							1	0.53
TDS								1

**Tabla 6.3. Matriz de correlación. Línea de flujo: lluvia – Fm. Guajaibón (grupo 3).**

N = 39	T	Cl	HCO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub>	Ca	Mg	Na	TDS
T	1	-0.07	0.03	0.11	0.00	0.04	0.09	0.04
Cl		1	0.41	0.06	0.48	0.21	0.23	0.47
HCO <sub>3</sub>			1	0.15	0.92	0.44	0.52	0.98
SO <sub>4</sub>				1	0.23	0.06	0.46	0.31

Ca					1	0.22	0.33	0.93
Mg						1	0.11	0.40
Na							1	0.58
TDS								1

**Tabla 6.4. Matriz de correlación. Línea de flujo: lluvia – Fm. Sierra Azul – Fm. Cacarajicara (Grupo 4).**

N = 39	T	Cl	HCO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub>	Ca	Mg	Na	TDS
T	1	0.31	0.28	0.31	0.27	0.31	0.34	0.29
Cl		1	0.96	0.62	0.95	0.95	0.79	0.96
HCO <sub>3</sub>			1	0.68	1.00	0.95	0.82	1.00
SO <sub>4</sub>				1	0.68	0.68	0.92	0.73
Ca					1	0.94	0.81	1.00
Mg						1	0.77	0.77
Na							1	0.85
TDS								1

**Tabla 6.5. Matriz de correlación. Línea de flujo: lluvia – Mezcla de litologías (Grupo 7).**

N = 39	T	Cl	HCO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub>	Ca	Mg	Na	TDS
T	1	0.60	0.67	0.13	0.63	0.58	0.60	0.63
Cl		1	0.50	0.50	0.73	0.46	0.54	0.60
HCO <sub>3</sub>			1	0.23	0.89	0.97	0.96	1.98
SO <sub>4</sub>				1	0.55	0.19	0.39	0.39
Ca					1	0.81	0.88	1.94
Mg						1	0.92	0.95
Na							1	0.98
TDS								1

**Tabla 6.6. Matriz de correlación. Línea de flujo: lluvia – Fm. San Cayetano (Grupo 8).**

N = 39	T	Cl	HCO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub>	Ca	Mg	Na	TDS
T	1	0.60	0.67	0.62	0.22	0.43	0.76	0.69
Cl		1	0.91	0.42	0.76	0.82	0.90	0.91





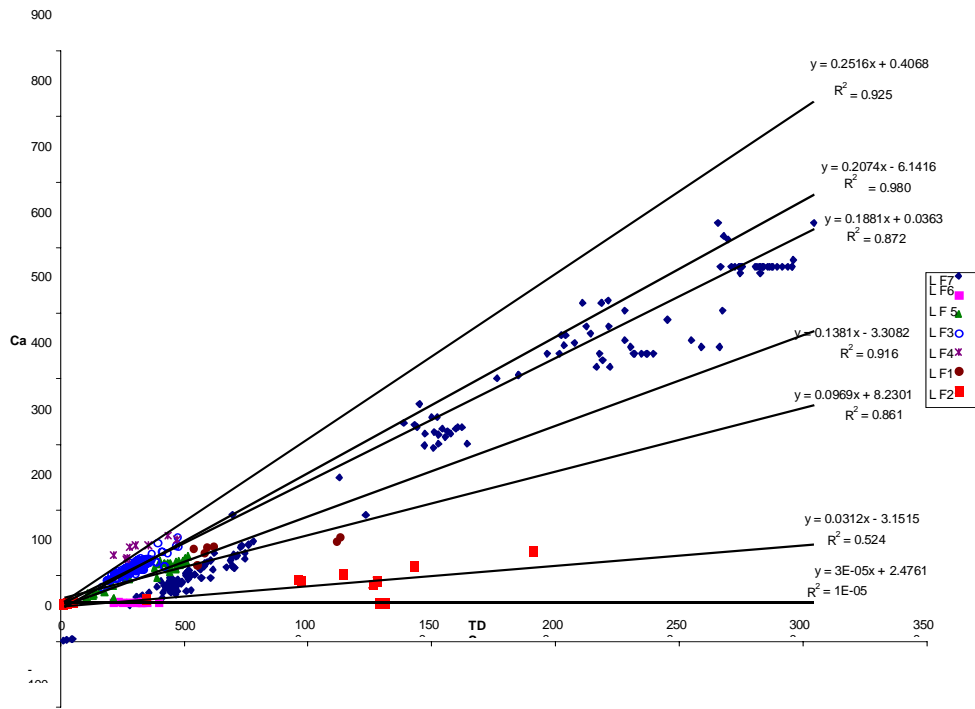


Figura 5. Relación entre la Concentración de calcio y TDS en las aguas de la Sierra del Rosario (L F: Línea de flujo).

T	H <sub>2</sub> S	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	(1)	T	H <sub>2</sub> S	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	
22	0	5	0	1	0	5		22	0	17	5	47	4	10	
Lluvia								Fm. Guajaibón (aguas de cuevas, F:L)							
(1)	T	H <sub>2</sub> S	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	(1)	T	H <sub>2</sub> S	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>
	22	0	15	3	69	7	15		23	0	15	10	56	5	15
Fm. Guajaibón (manantiales, F:L)								Fm. Guajaibón (surgencias, F:I)							
(2)	T	H <sub>2</sub> S	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	(1)	T	H <sub>2</sub> S	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>
	23	0	20	17	79	9	19		26	9	30	115	101	12	73
Fm. Sierra Azul (manantiales, FL)								Fm. Cacarájicara (surgencias, FI)							
(3)	T	H <sub>2</sub> S	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	(3)	T	H <sub>2</sub> S	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>
	24	0	12	3	16	4	16		23	0	21	8	54	11	39
Fm. Manacas (manantiales y pozos, FL)								Fm. Manacas (manantiales, FI)							
(4)	T	H <sub>2</sub> S	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>								
	23	0	16	5	3	44	13								
Asociación Ofiolítica (manantiales, FL)															
(5)	T	H <sub>2</sub> S	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>								
	27	67	114	83	30	17	32								
Aguas de mezcla (manantiales y pozos, FI)															
(6)	T	H <sub>2</sub> S	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	(6)	T	H <sub>2</sub> S	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>
	25	0	18	34	93	7	25		28	132	24	40	84	30	62
Fm. San Cayetano (pozo, FL)								Fm. San Cayetano (manantiales y pozos, FI)							
(7)	T	H <sub>2</sub> S	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	(7)	T	H <sub>2</sub> S	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>
	23	0	18	34	93	6	25		25	10	37	51	111	13	33
Fm. Artemisa (manantiales, FL)								Fm. Artemisa (manantiales y pozos, FI)							
(7)	T	H <sub>2</sub> S	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>								
	40	24	38	1344	468	52	127								
Fm. Artemisa (manantiales y pozos, FR)															

Figura 5. Sistema de flujos de la Sierra del Rosario (temperatura en °C; concentraciones iónicas aproximadas en mg/l).

A partir de los resultados obtenidos se puede establecer el modelo de evolución química de las aguas que se muestra en la figura 5. Como puede observarse en esta figura, en todos los casos se aprecia un aumento progresivo de los parámetros químico-físicos ( $T$ ,  $H_2S$ ,  $Cl^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  y  $Na^+$ ) desde las lluvias hasta los miembros finales de cada formación rocosa, a través de las líneas que conectan los flujos locales, intermedios y regionales correspondientes.

## CONCLUSIONES

El procesamiento mediante modelos estadísticos, químico-físicos e hidrogeoquímicos de 365 datos de análisis químico de aguas muestreadas en la Sierra del Rosario entre 1984 y 2001, permitió establecer el comportamiento geoquímico de 8 grupos de aguas seleccionados previamente sobre la base de los diferentes medio ambientes geológicos drenados. Las características de los diferentes flujos (locales, intermedios y regionales) y sus interacciones con los materiales acuíferos (calizas, rocas ultrabásicas y esquistos y areniscas) fueron interpretadas a partir de los parámetros químico-físicos, relaciones iónicas y otros índices geoquímicos relacionados con el equilibrio de las aguas respecto a los minerales calcita, dolomita y yeso.

En general, se encontró que las aguas de corto recorrido (flujos locales), poseen en sus emergencias temperaturas frías, un ambiente oxidante (altos valores de Eh y  $O_2$  disuelto), pH neutro (carbonatos) o alcalino (rocas ultrabásicas, esquistos y areniscas), bajo contenido de  $CO_2$  y de minerales disueltos, así como ausencia de  $H_2S$ . Durante el año las aguas suelen estar unas veces insaturados con respecto a la calcita y la dolomita (períodos lluviosos), mientras que en otras ocasiones se encuentran saturadas con respecto a dichos minerales (períodos secos).

Las aguas con un más largo y profundo recorrido subterráneo (flujos regionales), por el contrario, poseen en sus emergencias: temperaturas relativamente altas, un ambiente reductor (bajos valores de Eh y  $O_2$  disuelto), el pH es ácido o neutro, elevados contenidos de gases disueltos ( $CO_2$ ,  $H_2S$ , Rn), así como de macro ( $Cl^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$ ,  $SiO_2$ ) y microcomponentes (F, Li, Sr), cuyas proporciones recíprocas varían en dependencia del material acuífero y de las capas menos permeables con las cuales interactúan. Tienden a encontrarse saturadas o sobresaturadas con respecto a la calcita y la dolomita y cerca de la saturación respecto al yeso.

Las aguas con un recorrido de extensión y profundidad intermedio entre las dos anteriores (flujos intermedios) poseen parámetros químico-físicos e índices geoquímicos cuyas magnitudes son intermedias entre ambos tipos de aguas.

En los acuíferos someros (zona no saturada o vadosa) y de pequeño recorrido (flujos locales), constituidos por carbonatos de las formaciones Guajaibón, Sierra Azul y Artemisa, los principales procesos geoquímicos que explican el origen de la composición química de las aguas (del tipo Ca-HCO<sub>3</sub>) son la disolución de calcita y dolomita; en los acuíferos constituidos por rocas ultrabásicas (Asociación Ofiolítica), el intemperismo origina aguas Mg – HCO<sub>3</sub> cuyo origen se explica mediante la disolución de serpentinita; mientras que aquellos acuíferos compuestos de esquistos y areniscas producen por intemperismo aguas Ca > Na – HCO<sub>3</sub> (Fm. Manacas), Na – HCO<sub>3</sub> y Na – HCO<sub>3</sub> > Cl (Fm. Manacas), cuya composición se explica mediante procesos de disolución incongruente de plagioclasas. En todos los casos el contenido de SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> en las aguas se debe a la oxidación de pirita y el de SiO<sub>2</sub> a la disolución de sílice, la cual es mayor en los esquistos y areniscas.

En los acuíferos de mediana profundidad (zona saturada) y mediano recorrido (flujos intermedios), las aguas poseen una composición similar a las anteriores en las respectivas litologías, aunque localmente se obtiene aguas de carácter mixto con respecto a los aniones o cationes. Los procesos geoquímicos que originan estas aguas también son similares, pero en proporciones mayores de transferencia de masas.

En los acuíferos más profundos (zona de saturación y circulación profunda) y de extenso recorrido (flujos regionales), la composición química de las aguas de mayor mineralización originadas (Ca – SO<sub>4</sub>), se explica mediante procesos de disolución congruente de halita, calcita, dolomita y sílice, disolución incongruente de plagioclasa, oxidación de pirita con reducción de sulfato, mientras otras aguas de menor mineralización (Ca-SO<sub>4</sub>, Ca-SO<sub>4</sub>>HCO<sub>3</sub> y Ca>Na – SO<sub>4</sub>), se originan mediante por mezcla de aguas a partir de miembros extremos de la mezcla de composición Ca-SO<sub>4</sub>, Na-HCO<sub>3</sub> y Ca-HCO<sub>3</sub>, con la intervención de procesos geoquímicos similares a los señalados anteriormente.

Todas las aguas procedentes de diferentes tipos de acuíferos en la Sierra del Rosario, que emergen desde diferentes profundidades son de origen meteórico. A partir de las lluvias se pueden establecer 7 líneas de flujos cuya evolución es posible caracterizar por el creciente incremento de la temperatura y los contenidos de gases e iones disueltos.

Mediante la metodología empleada quedó demostrado, que en la Sierra del Rosario, la litología y estructura locales, controlan el modo en que las aguas adquieren su composición química.

## **BIBLIOGRAFÍA**

1. Alvarez, E., J.R. Fagundo. (1991): "SAPHIQ, un sistema para el procesamiento automatizado de datos hidroquímicos." En *Revista CENIC Ciencias Químicas* 22 (1): 59-65.
2. Appelo C. A. J. and D. Postma. (1993): *Geochemistry, Groundwater and Pollution*. Ed. Balkema, Rotterdam, Netherlands, 536 p.
3. APHA-AWWA-WPCF. (1989): *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 17 ed. APHA, AWWA, WPCF. Washington.
4. Carrillo-Rivera, J.J Cardona, B and D Moss, (1996): *Importance of the vertical component of groundwater flow: a hydrogeochemical approach in the valley of San Luis Potosí, México*. *Journal of Hydrology*. 185: 23-44.
5. Émbil, J. (1947): "El ácido sulfhídrico de las aguas medicinales de San Diego de los Baños y su posible relación con las calizas fétidas de donde brotan". En *Archivos del Instituto Nacional de Hidrología y Climatología Médicas*, Año I, No 4, 17-20.
6. Fagundo, J.R., J.J. Valdés, J. Rodríguez, J.M. Pajón, A. de la Cruz, A. García, M. Pulina. (1986): "Estudio preliminar sobre el proceso de denudación cársica en el polígono cubano-polaco del Pan de Guajaibón." En *Voluntad Hidráulica*, 70/71: 11-15.
7. Fagundo, J.R., J.E. Rodríguez, J.M. Pajón, E. Franco, G. Benítez, A.C. Rodríguez, J. Güerón e I. Abelló. (1993): "Caracterización hidroquímica de las aguas del Pan de Guajaibón y otras áreas cársicas cercanas a la Sierra del Rosario." En *Libro de Comunicaciones I Taller sobre Cuencas Experimentales en el Karst, Matanzas* (1992). Ed. Univ. Jaume I, Castellón (España): 43-53.
8. Fagundo, J.R. y J.E. Rodríguez. (1995): "Contribución al conocimiento hidrodinámico de los sistemas cársicos del Pan de Guajaibón y la meseta del Guaso a partir de datos hidroquímicos durante las crecidas." En *El Karst y los acuíferos Kársticos, ejemplos y*

*métodos de estudio*. Ed. A. Pulido-Bosch, J.R. Fagundo J. Rodríguez, Univ. Granada (España), 119-135.

9. Fagundo, JR, JE, Rodríguez, V Ferrera y P González. (1997): “Geoquímica de acuíferos cársicos de la Sierra del Rosario, Pinar del Río, Cuba.” En *Investigaciones Hidrogeológicas en Cuba*. Reprografía LANKOPY, SA, Bilbao (BI-2133-97). 135-149.
10. J.R. Fagundo, J.E. Rodríguez, J. Vega, J.E. Pajón. (1998): “Estudio del desarrollo de la carsificación a partir de las respuestas naturales en las emergencias”. En *Memorias Geología y Minería'98*. Ed. Centro Nacional de Ingeniería Geológica, I.G.P., La Habana, 215-218.
11. Fagundo, J.R., P. González, M. Suárez, J. Fagundo-Sierra, C. Melián y M. Llerena. (2000a) “Origen de la composición química de las aguas naturales y minerales procedentes de acuíferos carbonatados de la Sierra del Rosario”. En *Contribución a la Educación y la Protección Ambiental*. Editorial Academia, ISCTN 959-02-02535. Vol. 1, 198-203.
12. Fagundo, J.R., J.R., P. González, M. Suárez, J. Fagundo-Sierra, C. Melián, M. Llerena y L. Sánchez. (2000b): “Origen de la composición química de las aguas naturales y minerales procedentes de acuíferos no carbonatados de la Sierra del Rosario”. En *Contribución a la Educación y la Protección Ambiental*. Editorial Academia, ISCTN 959-02-02535. Vol. 1, 204-210.
13. Fagundo, J.R., P. González, M. Suárez, J. Fagundo-Sierra, L. Sánchez, B. Peña, C. Melián. (2001): “Origen de la composición química de las aguas del sistema hidrotermal San Diego de los Baños-Los Bermejales, Pinar del Río”. En *Memorias del VII. Taller de la Cátedra de Medio Ambiente*, ISCTN, La Habana. (en soporte electrónico).
14. Fagundo-Sierra, J., J.R. Fagundo, P. González, M. Suárez. (2001) “Modelación de las aguas naturales”. En *Memorias del VII. Taller de la Cátedra de Medio Ambiente*, ISCTN, La Habana 2001. (en soporte electrónico).

15. Fagundo, J.R, P. González, M. Suárez, L. Sánchez, B. Peña. (2001): “Estimación de la temperatura de los acuíferos profundos del Sistema Hidrotermal San Diego de los Baños-Bermejales.” En *IV Congreso de Geología y Minería, Ingeniería Geológica e Hidrogeología, Memorias GEOMIN*, 10 p.
16. Fagundo-Sierra, J., J.R. Fagundo, P. González, M. Suárez, C. Melián. (2002): “Sistema de base de datos de aguas minerales y mineromedicinales (TERMADAT).” En *Contribución a la Educación y la Protección Ambiental*, (en soporte electrónico).
17. Franco, E., J.R. Fagundo, J.M. Pajón. (1987): “Resultados de los estudios hidroquímicos realizados en el Pan de Guajaibón en el período enero 28 a febrero 17 de 1986.” En *Revista Ciencias de la Tierra*, 11, 17 p.
18. González, P., M. Llerena, M. Suárez, J.R. Fagundo, C. Melián, B. Luna, I. Herrera. (2001): “Sectorización de las aguas naturales y mineromedicinales de las montañas de la Sierra del Rosario y las Alturas del Mariel”. En *Memorias del VII. Taller de la Cátedra de Medio Ambiente*, ISCTN. La Habana. (en soporte electrónico).
19. González, P., B. Peña, J. R. Fagundo, F. R. Delgado, M. Suárez, C. Melián. (2002): “Aguas mineromedicinales en el occidente de Cuba.” En *Contribución a la Educación y la Protección Ambiental*, (en soporte electrónico).
20. Llerena, M., P. González, J. R. Fagundo, M. Suárez, C. Melián. (2001): “Aguas naturales, minerales y mineromedicinales de la Sierra del Rosario y las Alturas del Mariel. Regionalización de acuerdo a su tipo hidroquímico, mineralización, temperatura y uso terapéutico”. En *Memorias del VII. Taller de la Cátedra de Medio Ambiente*. La Habana. (en soporte electrónico).
21. Markowicz, M and Pulina M. (1979): *Ilosciowa polmikroanaliza chemiczna wód w obszarach krasu weglanowego*. University Slaskiego, Slaski. Poland 54 p.



22. Peláez, R, M. Olivares, M. del C. Núñez, y M. Valdivia. (1990): *Informe sobre la búsqueda detallada y exploración orientativa de las aguas minero-medicinales San Diego Bermejales*. Ministerio de la Industria Básica, Centro Nacional del Fondo Geológico, La Habana, Cuba. 159 p.
23. Peña, B., J. R. Fagundo, F.R. Delgado, L. Orbera. (2001): *Caracterización de fuentes minerales en el Distrito Físico Geográfico Pinar del Río, Cuba. IV Congreso de Geología y Minería, Ingeniería Geológica e Hidrogeología, Memorias GEOMIN 2001*, 9 p.
24. Pulina, M. y J. R. Fagundo (1984): *The Dynamic of the Contemporary Karstic Processes in the Tropical Area of Cuba. Preliminary report of the field investigations performed by the Expedition Guajaibon' 84 in the winter season 1984*. Univ. Slaski, Sosnowiec (Polonia), 42 p.
25. Pulina, M. y J.R. Fagundo. (1992): *Tropical karst and chemical denudation of western Cuba*. Geographia Polonica (Warsow) 60: 195-216.
26. Pszczolkowski, A. (1978): "Geosynclinal sequences of the Cordillera de Guaniguanico in western Cuba, their lithostratigraphy, facies development and paleogeography." En *Acta Geológica Polónica*, 28 (1) 1-96.
27. Rodríguez, J.E. y J.R. Fagundo, F. Cutié, C. Cruz, E. Franco. (1989): *Hidrología cársica del macizo del Pan de Guajaibón, Sierra del Rosario, Pinar del Río, Cuba, durante el año hidrológico Noviembre de 1984-Octubre de 1985. Monografía*. Ed. Academia, La Habana, 60 p.
28. Rodríguez, J.E. y J.R. Fagundo. (1995): *Hydrology and dynamics of tropical karst processes in Cuba*. Studia Carsologica (Brno) 6: 42- 54.

29. Tóth, J. (1995): "Groundwater as a geological agent. An overview of the causes, processes and manifestations." *Hydrogeology Journal* 7, 1-14.