

# GEOMORFOLOGIA E HIDROGEOLOGIA CARSIKA DEL VALLE DE PAN DE AZUCAR, SIERRA DE LOS ORGANOS, PINAR DEL RIO

LESLIE F. MOLERO-MARIO G. GUERRA OLIVA

## RESUMEN

Se examinan las características geomorfológicas e hidrogeológicas del valle fluvio-cársico y la serranía de kegelkarst de Pan de Azúcar, drenada esta última, por un conjunto de importantes fuentes cársicas, como los manantiales de La Pimienta y Cimarrones. Una atención especial se dedica a la determinación de los valores del campo de propiedades físicas del acuífero drenado por la surgencia de Cimarrones durante la recesión de 1976-1977, y al examen de las relaciones de equilibrio físico-químico de las aguas cársicas subterráneas.

## INTRODUCCION:

Entre los años 1975 y 1978 se efectuaron varias campañas de exploración hidrogeológica en el carso de montañas de Cuba occidental, orientadas a la evaluación de los recursos de explotación de las aguas subterráneas en estas comarcas, en categorías III-IV para un nivel de investigación general de Esquema. Sin embargo, ciertos sectores de la sierra de los Organos fueron estudiados con algún detalle, tanto por el interés de determinadas peculiaridades de su comportamiento hidrodinámico como por la necesidad de precisar los valores de sus recursos explotables, de acuerdo con los planes del Instituto de Hidroeconomía.

El valle de contacto o fluvio-cársico (Marginal, "rand-poljen") de Pan de Azúcar fue uno de los sistemas cársicos a los que se dedicó una atención preferencial. En el estiaje de 1977 fueron realizadas algunas campañas de prospección que abarcaron el frente septentrional de la unidad morfológica constituida por las sierras de Chichones, del Medio y Pan de Azúcar propiamente dicha. El levantamiento hidrogeológico abarcó consecuentemente, una área de unos 25 km<sup>2</sup>, a aproximadamente 13 km al este del poblado de Matahambre.

Este sistema, parte de la región cársica de la sierra de los Organos (Molerio, 1974) se incluye, geológicamente, en la llamada zona estructuro-facial de Guaniguanico, sobre las unidades tectónicas Celadas y Viñales (en parte); de manera que se integra, esencialmente por depósitos de edad Jurásica a parte del Paleógeno, representados por las siguientes unidades estratigráficas:

- FM. San Cayetano (Jurásico inferior-medio): areniscas cuarcíferas con intercalaciones de aleurolitas y arcillas;
- FM. Azúcar (Jurásico superior, Calloviano): aleurolitas y esquistos con lentes de calizas;

## CARACTERISTICAS GEOMORFOLOGICAS

### Generalidades

La Geomorfología de la sierra de Pan de Azúcar ha sido muy poco estudiada. Las conclusiones que aquí se ofrecen se han derivado de la construcción e interpretación de una serie de mapas morfométricos, interpretación de fotos aéreas, y los resultados de la cartografía geomorfológica de campo a escala 1:50 000.

El valle de Pan de Azúcar es, sin dudas, un valle de contacto limitado por las elevaciones predominantemente terrígenas del Jurásico inferior medio al norte, y las series carbonatadas de edad Jurásico superior al sur. El río homónimo, que ha labrado y condicionado directamente la evolución geomorfológica del área y, en no poca medida de sus características hidrogeológicas, es una corriente fluvial permanente de alimentación en gran parte autóctona, alineada según la estructura tectónica local, que desemboca en la costa septentrional de la provincia de Pinar del Río.

Sin lugar a dudas pueden reconocerse los rasgos generales de la región cársica a la que pertenece. Estos son: el fuerte control desempeñado por la estructura en la conformación del relieve, el corte geológico general del macizo, la tipicidad del exorrelieve cársico, y su particular evolución morfológica post-orogénica.

- *Fm. Jagua (Jurásico superior, Oxfordiano): esquistos arcillosos, areniscas y calizas con concreciones calcáreas;*
- *Grupo Viñales, Fm. Guasasa (Jurásico superior, Kimeriádiano): calizas pelitomórficas dolomitizadas;*
- *Grupo Viñales, Fm. Pons (Jurásico superior, Cenomaniano-Turoniano): calizas, argilitas y pedernales;*
- *Fm. Manacas (Eoceno medio, Luteciano): areniscas, aleurolitas, arcillas, mezcladas con olistolitos de rocas efusivas, sedimentarias y magmáticas, fundamentalmente del tipo de las ultrabasitas.*

*Estas unidades se encuentran complejamente relacionadas entre sí debido a los fenómenos de sobreco-rrimientos poligeneracionales que caracterizan esta parte del eugeosinclinal.*

De acuerdo con esto, tres zonas resultan claramente definidas:

1. Una *zona no cársica* septentrional, constituida por series terrígenas y paquetes de hiperbasitas en los que predominan procesos genéticos de arroyada en manto y en canales, con vegetación de pinos y herbácea, fuertemente influenciada por agentes antrópicos. En general, las cimas son planas, a niveles separados por pequeños rangos de variación hipsométrica.
2. Una *zona cársica*, representada en las elevaciones de tipo *kegel* de las calizas del Jurásico superior, frente erosivo-denudativo de tipo cársico, con paredes empinadas, de fuertes pendientes, intensamente corroídas, donde la acción antrópica es mínima y se conserva en mayor grado la vegetación indígena. Predominan aquí los procesos de denudación y secundariamente de erosión fluvial, dada ésta, indistintamente, por corrientes que discurren internamente por el macizo como por la red implantada en superficie.
3. Finalmente, la *zona de articulación* entre ambos complejos de relieve, definida genéricamente en una superficie de fondo de valle que presenta una no muy clara interrelación de morfologías, en las que a los re-

lictos de láminas desarticuladas carsificadas, se superponen o coexisten depósitos acumulativos de origen fluvial o sus combinaciones.

De este modo, las unidades morfológicas anteriores constituyen, de manera general, sin entrar en subdivisiones más delicadas, los complejos morfogenéticos presentes en el área bajo estudio y que con mayor o menor intensidad han modelado el relieve, en diferentes fases, articulando unidades que esencialmente son el resultado de procesos de erosión diferencial modificados con posterioridad por intensos procesos de carsificación bajo diversos paleoclimas.

#### *Desarrollo de las superficies de erosión y su cronología*

Para la vecina región de Sumidero, al suroeste de nuestro territorio, Acevedo (1971) definió las siguientes superficies de erosión:

- Superficie Cuyaguateje (+80+100 m) – Holoceno
- Superficie Pinares de Calientes (+80+100 m) – Pleistoceno
- Superficie Pica-Pica (+300+320 m) – Mioceno
- Superficie pre Pica-Pica (más de +350 a +400 m) – Paleógeno

Para toda la sierra de los Organos, Lehmann (1955) distinguió los siguientes niveles principales:

- Cima de los mogotes (+300 a +320 m)
- Cuchillas (+280 a +300 m)
- Fondo de los hoyos de terreno (+80 a +100 m)

Acevedo (1971) discute brevemente esta cronología y el carácter genético de las superficies en el área por él estudiada. En la zona del valle de Pan de Azúcar tentativamente hemos estable-

---

cido los siguientes elementos fundamentales para el ordenamiento de las superficies de erosión:

- Nivel de fondo de randpoljen, superficie fluvio-cársica (+50 m)
- Nivel de relieve degradado, coincidente con el nivel de erosión de las alturas de Pizarras, y con la base de la serranía mogótica (+50+100, +250 m)
- Gipfelfluren cársico secundario (+250 a +350 m)
- Gipfelfluren cársico primario (más de +350 m a +400 m)
- Nivel de fondo de hoyos de montaña (+150 m)

A nuestro juicio resulta aún prematuro establecer alguna cronología para estas superficies.

#### *Análisis morfométrico del relieve*

El análisis que sigue fue elaborado a partir de mapas de desarticulación del relieve, de pendientes y de la relación Z/Rf, todos a escala 1:50 000.

#### *Disección horizontal*

El mapa de desmembramiento horizontal del relieve permitió obtener las siguientes conclusiones:

La vertiente norte del valle de Pan de Azúcar está representada, fundamentalmente, por una alternancia casi rítmica de relieves que varían de fuerte a considerablemente desmembrado, con valores que oscilan entre los 50 y 250 m. El cambio brusco de estos valores con los marcados en el fondo del valle muestra una anomalía morfológica que sugiere la presencia de formas estructurales o estructuro-erosivas, esto es, que se trata de un frente de erosión.

Considerando el fondo del valle como una zona deprimida entre dos elevadas, el grado de desmembramiento ha sido tomado a partir del parateguas principal, alcanzando por tanto valores

de relieve medianamente desmembrado, esto es, entre 500 y 1000 m.

El sector que corresponde a la serranía mogótica presenta índices que varían de fuerte a considerablemente desmembrado, predominando este último. Los rasgos peculiares de este complejo muestran sin lugar a dudas, un fuerte control estructural en la conformación de sus elementos morfológicos, destacándose de forma particular el caso de las pequeñas "ensenadas" que serpentean el frente septentrional de la sierra.

#### *Disección vertical*

De acuerdo con los valores de la disección vertical se reconocen los siguientes sectores morfológicos:

- llanura colinosa poco desmembrada
- llanura colinosa medianamente desmembrada
- llanura colinosa profundamente desmembrada
- relieve montañoso poco desmembrado
- relieve montañoso medianamente desmembrado

Generalizando la interpretación del mapa en cuestión se obtienen las siguientes conclusiones generales.

El sector del fondo del valle presenta valores que fluctúan entre 25 y 100 m. Esta variación progresiva en sentido ascendente y la conjugación de la red cartografiada en este caso, conjugada con la del mapa de desmembramiento horizontal permite aceptar con certeza el control estructural del frente septentrional interpretado por Alvarez Sánchez (1971) como un frente de cabalgamiento tectónico, ya que, sobre todo, e independientemente a las evidencias geológicas, los valores máximos de disección calculados se circunscriben al borde del escarpe que está en contacto con el valle.

---

La máxima inflexión de las curvas concuerda con esta zona (ya denotada como anomalía morfológica) con la orientación de las estructuras.

Las partes altas de la sierra presentan valores que fluctúan entre 100-250 m, correspondiente con un relieve montañoso poco desmembrado, cuya continuidad se ve interrumpida por un nivel de cimas donde la disección alcanza hasta 400 m. Esto se interpretó como correspondiente a una superficie relictica, cuya edad aún no está clara.

Hacia el sur del área mapeada se encuentra una segunda zona de desmembramiento, en la localidad conocida como sierra de Celadas "Los Cañones", en que se produce una disminución progresiva de los índices de disección según se avanza del primero al segundo sitio, comenzando a aumentar nuevamente en el fondo del polje de los "Los Cañones".

#### *Pendientes*

Aún falta una clasificación tipogenética de pendientes realmente adecuada.

Los trabajos que en este sentido se han realizado en las zonas de kegel aún distan de ser generalizados y los índices cuantitativos de uso en el país tienen muy limitada aplicación en estos territorios. No obstante, se adelantarían algunos resultados del estudio de este índice en esta localidad.

A la altura de Quemado de Pineda, límite inferior del área estudiada las pendientes son suaves en el fondo del valle, menores de 1°, tornándose más abruptas en las márgenes de éste. Las paredes de los mogotes presentan vertientes más pronunciadas, superiores a los 70°, características de un relieve montañoso. Pendientes locales inferiores a 25° son referidas a montañas bajas aisladas con rasgos variables entre suaves y abruptas que alternan con morfologías de altiplanicies y depresiones cársicas en los niveles superiores.

Hacia el norte las pendientes se hacen medianamente abruptas, sobre todo hacia la ensenada

de Cimarrones. Al centro, conformando la vertiente sur de este elemento, sobre una superficie de 2 km<sup>2</sup>, se observa un sector de paredes extraplo-madas, de casi 90° coincidente con una zona altamente tectonizada.

En las más altas cúpulas arcillosas se observan valores entre 7 y 24°, donde el drenaje debe limitarse, en época de lluvias, a pequeñas arroyadas de vertientes, predominando, consecuentemente, un proceso de erosión fluvial y grabitacional, interrelacionándose las terrazas fluviales y las cortezas de intemperismo de las ultrabasitas asociadas a las unidades de mélange.

#### *Formas del relieve*

Se distinguen dos grupos fundamentales: a) las formas erosivas y erosivo-acumulativas, y b) las formas cársico-denudativas.

#### *Complejo de formas erosivas y erosivo-denudativas*

Este conjunto de formas se circunscribe al valle propiamente dicho y a las vecinas alturas de Pizarras; esto es, que su desarrollo se limita al área de propagación de los sedimentos terrígenos. En ellos, los procesos más desarrollados y las formas más comunes están representadas por la erosión de las pendientes debido a arroyada difusa o concentrada. Tales procesos están dominados por la presencia de un nivel de base cercano definido por el río Pan de Azúcar.

Los procesos de erosión fluvial se concentran en las márgenes del valle, donde son, a la vez, más evidentes. Con el aporte del autóctono cársico y la erosión de los materiales que lo constituyen, ya hemos definido el sector como un valle fluvio-cársico y, sin dudas, es una forma típica de erosión diferencial. La particularidad de presentar un macizo cársico en uno de sus límites es la que condiciona, inicialmente, el desarrollo del fluvio-carso, de manera que al norte el valle, de fondo plano, presenta nichos de erosión fluvial, terrasettes y pendientes lavadas, con acumulación de los detritos en la base, en tanto al sur, se encuentra, casi exclusivamente el escarpe erosivo del frente del kegel.

---

Se reconoció solamente un nivel de terraza superior al plano de inundación, cuyas propiedades hidrogeológicas se desconocen.

#### *Complejo de formas cársico denudativas*

Fueron reconocidos campos de lapiés establecidos sobre los relictos erosivos del kegel. Estas zonas afloran en una extensa superficie al norte de la sierra y llegan a formar una importante zona de absorción activa.

En los lapiés, generalmente libres, fueron reconocidas formas menores del tipo de las *tinajitas* (Molerio y Barceló, 1976). Por su parte, los campos de lapiés de tipo semilibres forman sectores menos importantes y aparecen localmente hemifosilizados por aluviones, cobertura comúnmente de poca potencia y baja permeabilidad.

Las restantes formas reconocidas se corresponden con grupos de elementos de absorción, conducción y emisión que por su importancia hidrogeológica serán tratados más adelante.

#### CARACTERISTICAS HIDROGEOLOGICAS DEL CARSO

Dos zonas cársicas se distinguen morfológicamente, diferenciadas entre sí por su comportamiento hidrogeológico: el randpoljen o fluviocarso y las elevaciones mogóticas del tipo kegel.

El randpoljen resulta típico, excavado en una zona tectónica preferencial con apreciables indicios de discordancias geomorfológicas, en general, de suave pendiente, y drenado por una corriente fluvial permanente de alimentación híbrida, pero esencialmente cársica, que es el propio río Pan de Azúcar. Los índices morfométricos más importantes de este valle de contacto, son los siguientes:

- Area de alimentación teórica: 10 km<sup>2</sup>
- Longitud real: 8 km
- Longitud rectificada: 6 km
- Coeficiente de sinuosidad: 1,33

- Pendiente: 0,5 %
- Rupturas de pendiente: 5
- Altura media: 60 m (s.n.m.)

La zona de kegelkarstes también típica, constituida por elevaciones de fuerte pendiente, casi extraplomadas, con alturas máximas de +422 m, y una media de +300 m, y en general a +200 m sobre el valle contiguo, carente por completo de drenaje superficial, formando una unidad estructural, morfológica y morfogenética que se extiende al sur y al noreste del valle, aunque no puede decirse que sea, también, una unidad hidrogeológica, ya que los numerosos puntos de emisión permanentes parecen caracterizarla más como un sistema cársico que agrupa, hasta el momento, los aparatos drenados por las surgencias de La Pimienta, El Tubo y Cimarrones, sin que se obvie la posibilidad de que existan otras no reportadas aquí y aún, aparatos colgados de funcionamiento estacional o activos, según se deriva de la presencia de circuitos hipogeos de drenaje vigente explorados en la sierra de Chichones. Independientemente a esto, el sector aquí estudiado puede conceptuarse como un merocarso activo sobre el nivel de base, expresado en un sistema cársico de patrón agrietamiento, con descarga concentrada, localizada, en régimen libre, al nivel de los talwegs epigeos que originan.

#### *Condiciones de absorción*

La absorción se efectúa a través de los sistemas de dolinas de la cima de las serranías, literalmente cribada de depresiones, sobre todo en las inmediaciones de la surgencia de Cimarrones. Dos ascensiones practicadas aquí permitieron observar un gran número de dolinas generalmente circulares, de variable profundidad, muy próximas unas de otras, con un valor de densidad superficial del carso (Molerio, 1970) cercanos a 1. Hacia el suroeste el número de formas de absorción susceptibles de ser representadas a escala 1:50 000 es considerablemente menor.

---

*En general parece tratarse en la mayor parte de los casos de dolinas corrosivas de patrón agrietamiento.*

### *Condiciones de drenaje*

Durante los trabajos de campo fueron localizadas diez cavidades directas, aparentemente de caudal autóctono, que pueden agruparse del modo siguiente:

- Cavidades muertas, desactivadas o hemifósiles:

Cueva No. 5

- Cavidades de funcionamiento estacional:

Cueva No. 1

Cueva No. 2

Cueva No. 4 (stavelle)

Cueva No. 6

Cueva No. 7

Cueva No. 8

Cueva No. 9

Cueva No. 10

- Cavidades de funcionamiento permanente:

Cueva No. 3

Esta última es una modalidad particular en la tipología hidrogeológica de las formas de conducción en el kegel de la sierra de los Organos que ya hemos observado en otros sitios, tales como El Pesquero y San Carlos. Se trata de conductos saturados de agua y de acceso vertical o subvertical, conectados real o virtualmente con un nivel de base local cercano y cuya descarga se efectúa por niveles inferiores en régimen la-

*minar, o de modo brusco, salvando la galería de acceso en régimen turbulento por rebosamiento.*

### *Condiciones de descarga*

En el frente norte de la sierra de Pan de Azúcar fueron localizadas tres zonas de descarga:

- Fuentes de La Pimienta
- Fuente de El Tubo
- Fuente de Cimarrones

La primera de ellas es captada con diversos fines. El gasto drenado aguas abajo de la toma, en enero de 1976 fue de  $0,156 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ . Se trata de una surgencia múltiple, horizontal, que descarga en régimen libre, con cierta presión.

La fuente de El Tubo es una surgencia simple de flujo difuso que descarga en una zona de debilidad estructural, y presentaba un caudal muy bajo en la misma época ( $0,002 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ). Una ascensión por las paredes del mogote no arrojó la presencia de cavidades emisivas o eventuales trop-pleins, activos o no, sobre la fuente.

La fuente de Cimarrones es una surgencia cársica permanente, de caudal autóctono que aparentemente ha jerarquizado la descarga de la circulación hipogea en el sector nororiental de la sierra de Pan de Azúcar, que se efectúa a nivel del talweg epigeo y tributa sus aguas al río Pan de Azúcar, en drenaje convergente luego de aproximadamente un kilómetro de recorrido epigeo.

### *Rasgos generales del drenaje en la ensenada de Cimarrones*

El talweg epigeo del arroyo Cimarrones está excavado en calizas del Jurásico superior, cubierto por un nivel superior de terraza fluvial compuesto por arenas arcillosas a calcáreas, de grano medio, y arcillas arenosas de grano fino a grueso, que alternan con cantos calcáreos poco elaborados, generalmente angulares o subangulares, normalmente de grandes dimensiones, producidos por clastificación en las pendientes.

---

Las observaciones geoespeleológicas practica das hacen suponer que existen al menos, cinco niveles de drenaje hipogeo; dos de ellos activos y tres estacionales. Es posible que existan algunos subniveles pero ello no está claro aún.

El primer nivel activo, superior, y de funcionamiento permanente, se corresponde con la surgencia de Cimarrones, cuyo comportamiento hidrodinámico será examinado más adelante. El segundo nivel activo viene definido por la zona de hidrocirculación hipogea por donde drenan las aguas de una pérdida total del arroyo a unos 50 m de la pared de la sierra, resurgiendo en el mismo frente de la ensenada con caudales ostensiblemente superiores.

En la pared oriental de la propia ensenada de Cimarrones se encuentran dos niveles de cavernamiento perfectamente bien definidos a 10 y 15 m, aproximadamente, sobre la surgencia. Estas cavidades presentan galerías plenamente vigentes con importantes caudales circunñando en régimen turbulento cuyos niveles piezométricos se encuentran virtualmente al mismo nivel que los de las aguas de la surgencia y oscilan estacionalmente con éstas. En las paredes y techo de ambas cavidades fueron reconocidos signos evidentes de erosión turbillonar cuya altitud coincide con la del nivel de inundación de la ensenada.

En la ensenada contigua, al oeste del Abra de Cimarrones fue estudiado otro nivel de cavernamiento al que se integran, al menos, tres cavidades de tipo directo, emisivo, de caudal autóctono. Estas formas de conducción drenan a un talweg epigeo común que concluye al arroyo Cimarrones. Estas cavidades suelen presentar una descarga violenta, en régimen turbulento, sincronizada con la descarga de los niveles más altos de drenaje de la surgencia de Cimarrones. Estos son, por tanto, los niveles de descarga lateral estacional del aparato cársico.

#### *Características hidrodinámicas de la surgencia de Cimarrones*

El cálculo de caudales de la fuente se basó en el estudio de la última rama del hidrograma en

recesión para un valor de  $t$  de 76 días (entre enero 5 y marzo 22, 1977).

Esta parte del hidrograma responde a una ecuación del tipo:

$$Q_t = 0,187 e^{-0,0048 t}$$

El valor del coeficiente de recesión ( $K$ )

$$K = e^{-\infty}$$

muestra un valor en el rango para los subregímenes finales del agotamiento, esto es, ausencia total de recarga natural en el acuífero. En efecto:

$$K = 0,995$$

indicando, claramente el exclusivo aporte de agua subterránea autóctona en el hidrograma registrada.

Los índices hidrodinámicos que caracterizan la rama del hidrograma en el período estudiado, y, por tanto, representan los valores del campo correspondiente de las propiedades físicas del acuífero, son las siguientes:

Transmisividad:  $19\,956 \text{ m}^2\text{día}^{-1}$

Coficiente de almacenamiento: 0,215

---

Conductividad hidráulica:  $92\,819\text{ m}^2\text{día}^{-1}$

Variación de reservas: 0,103

De acuerdo con los valores de precipitación y recursos de explotación evaluados, para el área de Kegel la ecuación general de balance tiene la siguiente expresión en % de P:

$$P = Et + Iw \pm \Delta R$$
$$= 0,6889 + 0,2486 \pm 0,0625$$

donde:

P — precipitación en el período examinado

Et — evapotranspiración

Iw — infiltración eficaz

$\Delta R$  — variación de reservas

haciendo, en la ecuación, lógicamente, el escurrimiento en el kegel:

$$R = 0$$

Debe tenerse en cuenta que estos índices consideran solamente un período muy breve de ob-

servaciones, correspondiente con la última rama de la recesión de un año, por lo que, si bien los índices calculados para ella son perfectamente representativos de la estructura del campo de propiedades físicas de un acuífero cársico de montaña, es evidente que un análisis de la variación estacional de sus propiedades haría variar, seguramente, el valor de los elementos del balance, sobre todo, en el sentido de aumentar Iw en detrimento de Et.

#### HIDROQUIMICA DE LAS AGUAS SUBTERRANEAS

El muestreo hidroquímico fue realizado para caracterizar tanto la calidad de las aguas subterráneas como para conocer el estado de equilibrio de la solución carbonatada. Nos referiremos en este epígrafe a este último aspecto.

Tres muestras fueron colectadas en las aguas de la surgencia, controlándose en el campo pH, temperatura y conductividad eléctrica. Los análisis fueron realizados pocas horas después de colectadas las muestras y sus resultados se presentan en la tabla 1 procesados los índices de equilibrio de acuerdo con la metodología de Thrailkill (1976).

Las muestras 1 y 3 fueron colectadas en la segunda emergencia, en tanto, la 2 fue tomada en la primera emergencia simultáneamente con la No. 3 del análisis de los valores de la tabla 1 y el gráfico de la fig. 4 se deriva lo siguiente:

- Las aguas emergen *insaturadas* de calcita del macizo cársico del kegel y luego de unos 50 m de recorrido epigeo se pierden totalmente por sumideros difusos en el talweg. Si en ese tramo las aguas se saturan o se mantienen en desequilibrio no puede acla-

TABLA 1

	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Molalidad $\text{Ca}^{2+}$	0,00083	0,00068	0,00076
$\text{Mg}^{2+}$	0,00004	0,00004	0,00007
$\text{HCO}_3^-$	0,00218	0,00178	0,00223
Coefficiente de actividad:			
$\text{Ca}^{2+}$	0,65	0,70	0,64
$\text{Mg}^{2+}$	0,65	0,70	0,64
$\text{HCO}_3^-$	0,90	0,91	0,89
Actividad $\text{Ca}^{2+}$	0,00053	0,00048	0,00049
$\text{Mg}^{2+}$	0,00002	0,00003	0,00004
$\text{HCO}_3^-$	0,00196	0,00162	0,00199
pH	7,0	7,8	7,2
Conductividad medida	397	397	560
Fuerza iónica	0,00901	0,00600	0,00952
Temperatura °C *	24	23,6	24,1
Dureza total	184,6	191,2	231,6
RSC (relación de saturación de calcita)	0,0037	0,0050	0,0040
$\text{pCO}_2$	0,0015	0,0012	0,0015

(\*) Los cálculos se efectuaron para  $T=25^\circ\text{C}$ .  
 Las fechas de colecta de las muestras son las siguientes:  
 Muestra 1 — Enero 5, 1977  
 Muestra 2 — Marzo 22, 1977  
 Muestra 3 — Marzo 22, 1977

Tabla 1 Índices físico químicos de las aguas subterráneas de la surgencia de Cimarrones, sierra de Pan de Azúcar.

rarse. La ausencia de cortezas de sínter en la segunda zona de descarga parece indicar claramente que no hay precipitación de la solución por alteraciones de temperatura o presión.

- Presumimos entonces que el nuevo y breve recorrido hipogeo que inician las aguas, se realiza por soluciones *insaturadas* de calcita, de manera que las aguas mantienen una cierta capacidad de disolución. Las altas velocidades de circulación, son, asimismo, una limitante para que la solución alcance el equilibrio.

- Las relaciones entrada-salida del gráfico de la figura muestran perfectamente que en el

nuevo recorrido hipogeo las aguas incorporan por disolución 80 mg/l de sales. Los aumentos de dureza, sales solubles totales y en la concentración de los macroconstituyentes  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{Na}^+$ ; indican claramente la incorporación por disolución de nuevas sales. Paralelamente ocurre una disminución en el pH y un ligero aumento en los valores de temperatura y fuerza iónica.

- Aún después de esto, las aguas de la surgencia se incorporan al río Pan de Azúcar con un nivel de insaturación RSC aún menor que el que poseían en la zona inmediata al kegel.

Comparando las muestras 1 y 2, tomadas en el mismo sitio con 76 días de diferencia no mues-

---

tran prácticamente diferencia, excepto en el valor del índice de saturación de calcita, ligeramente inferior en la fecha de colecta de la muestra 1.

La correspondencia entre los valores de las muestras colectadas en el gráfico semilogarítmico de Schoeiler indican, claramente, que se trata de aguas de un mismo aparato de drenaje, o sea, un reservorio único, de la misma naturaleza petrográfica y edad, y en principio, independientes del carácter de almacenamiento.

En lo que respecta a las relaciones fundamentales entre los macroconstituyentes, se nota que la relación  $r\text{SO}_4^{2-}/r\text{Cl}^-$  disminuye de la primera a la segunda emergencia (1,73 a 1,20) lo que se explica considerando las relaciones entre velocidad de disolución y déficit de saturación entre los cloruros y sulfatos, además de que en este tipo de rocas es común la presencia de  $\text{SH}_2$  que incorporan  $\text{SO}_4$  a las aguas. Por otro lado, en nuestro caso no se cumple la relación según la cual  $r\text{Mg}/r\text{Ca}$  debe disminuir en aguas abajo (Schoeiler, 1969. : 73) debido al incremento en la solubilidad producido por el aumento de  $p\text{CO}_2$  en el segundo recorrido hipogeo y a la eventual ocurrencia de fenómenos de efecto de mezcla.

## CONCLUSIONES

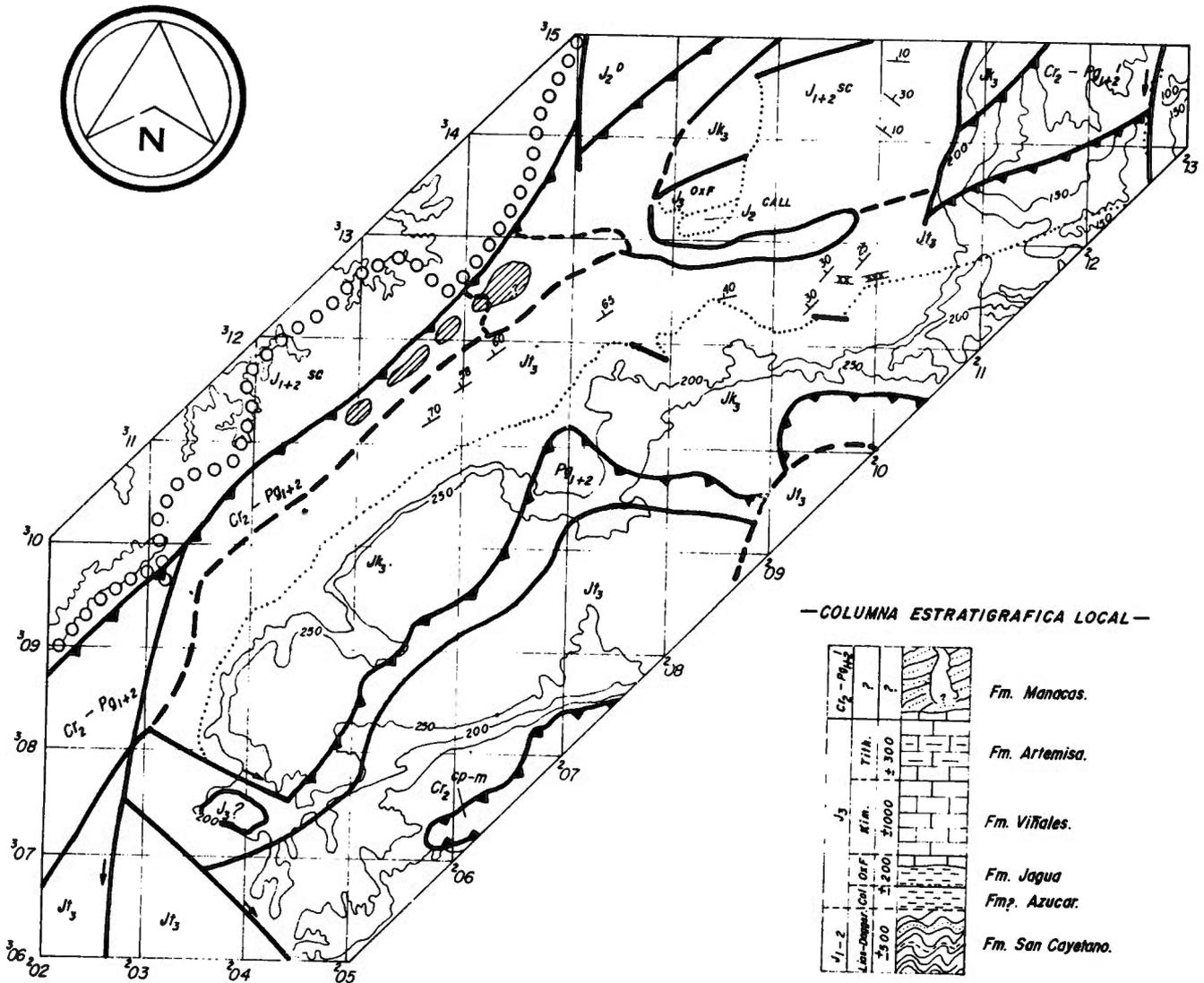
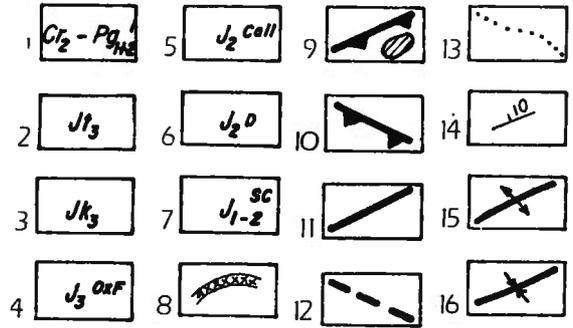
1. En la constitución geológica del territorio entran a formar parte depósitos de las San Cayetano, Azúcar, Jagua, Guasasa, Pons y Manacas, de edad Jurásico inferior-medio a Eoceno medio, complejamente relacionadas mutuamente debido a los fenómenos de sobrecorrimientos poligeneracionales que caracterizan esta parte del eugeosinclinal.
2. La investigación geomorfológica mostró la presencia de las siguientes superficies de

erosión, las que aún no ordenamos cronológicamente.

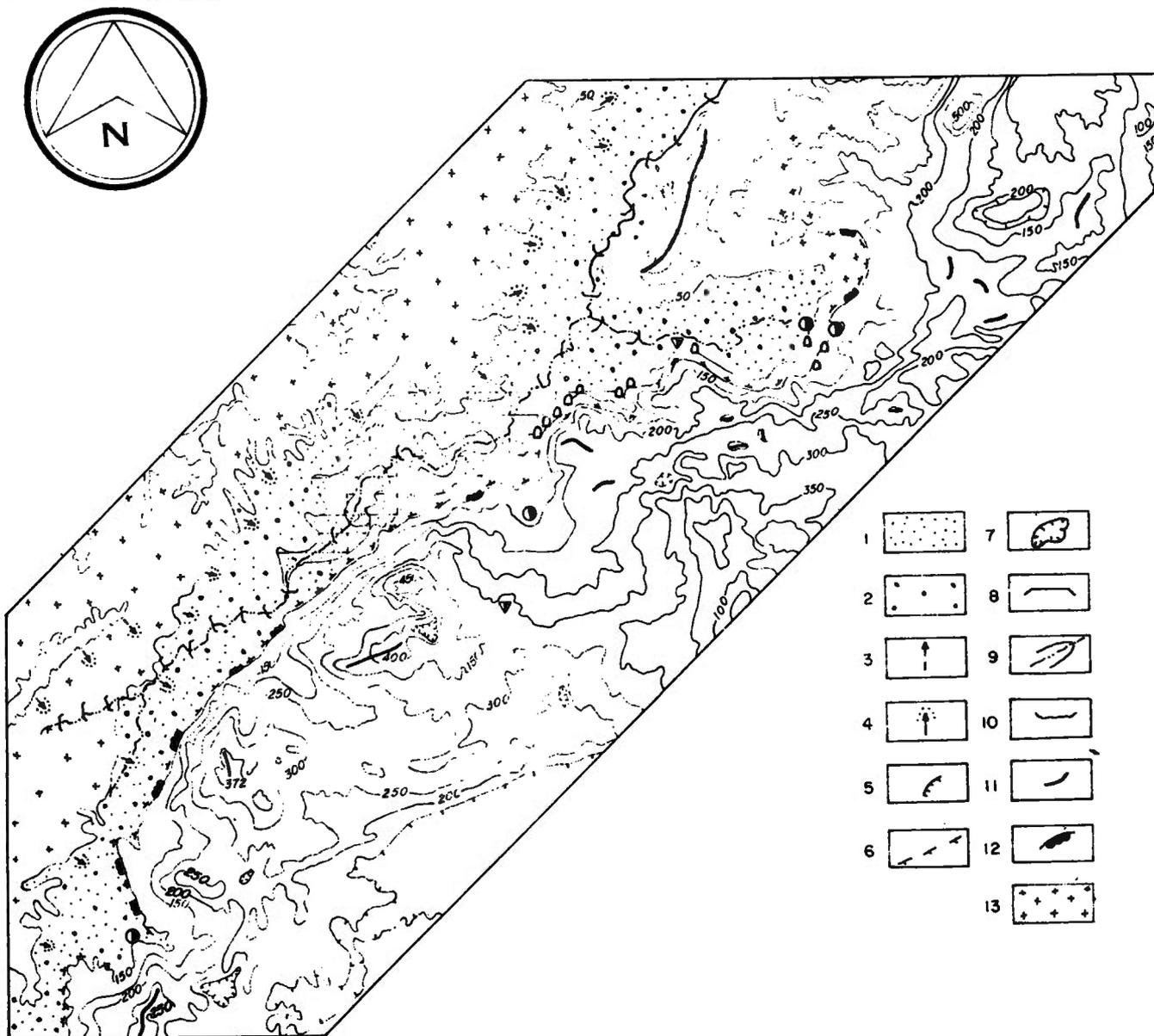
- Nivel de fondo de randpoljen  
(a +50 m) + 100, y +250 m)
- Nivel de relieve degradado  
(a +50 m, + 100, y +250 m)
- Gipfflüren cársico secundario  
(+250 a +350 m)
- Gipfflüren cársico primario  
(+350 a +400 m)
- Nivel de fondo de hoyos de montaña  
(+150 m)

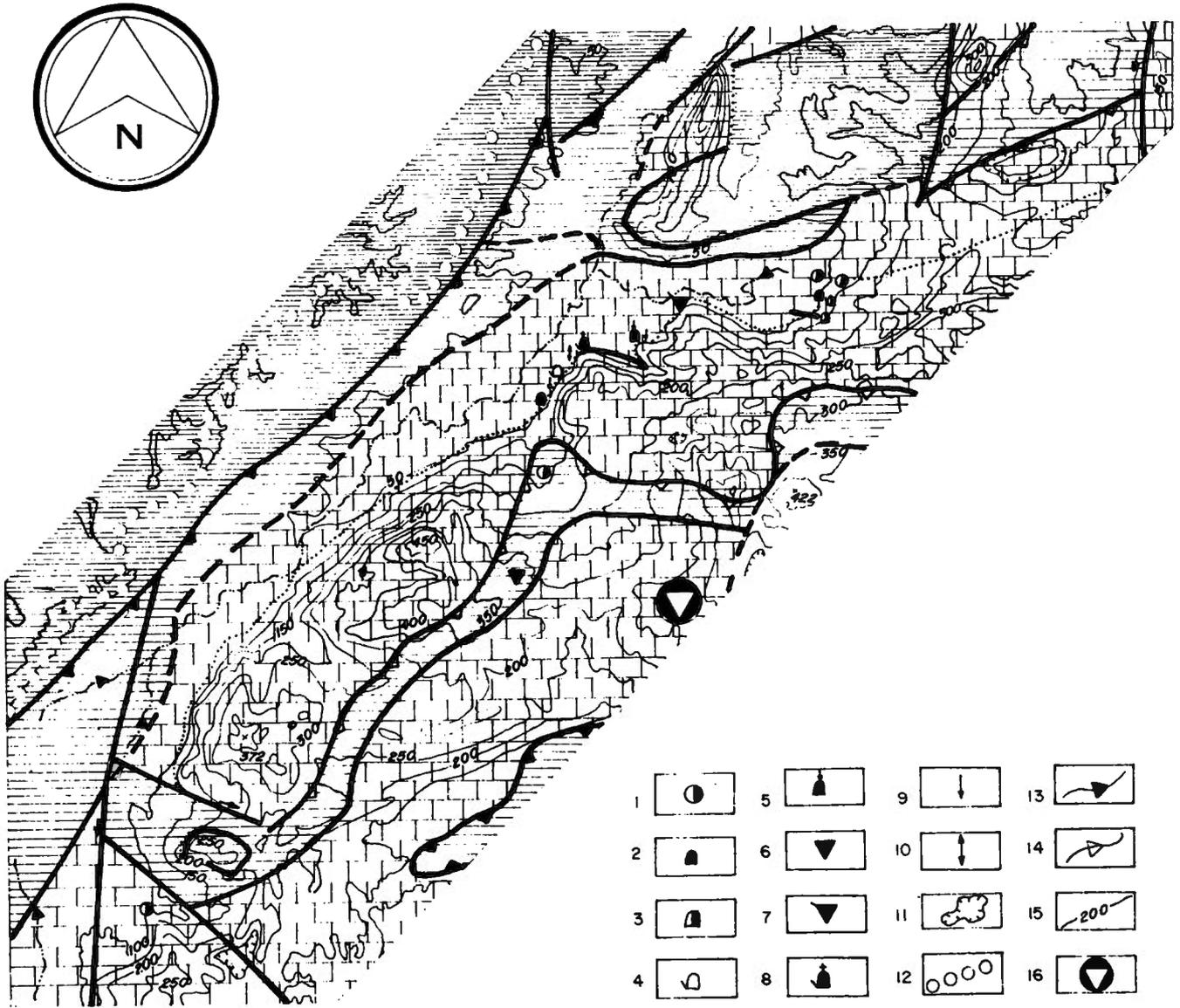
3. Morfológicamente se distinguen dos zonas en el curso, diferenciadas por su comportamiento hidrogeológico: el randpoljen o fluvio-carst y las elevaciones mogóticas de tipo kegel, excavado el primero en una zona de debilidad estructural y drenado por una corriente fluvial permanente, de alimentación híbrida y la segunda, constituida por elevaciones de fuerte pendiente con alturas máximas de +422 m y elevada, en general a 200 m sobre el valle contiguo, carente por completo de drenaje superficial, siendo el subterráneo de una extraordinaria importancia según se deriva de los altos valores de las propiedades físicas del acuífero y de los caudales drenados por las importantes formas de emisión concentradas en la vertiente septentrional de la Sierra que conforman varios aparatos cársicos independientes.

1. Mapa geológico del valle de Pan de Azúcar y sus alrededores, basado en los trabajos de Alvarez Sánchez (1971) y modificado por Díaz Machin, (1977).  
 (1) Secuencias de flysch, grawackas, lutitas y conglomerados asociados a Fm. Manacas; (2) Calizas finamente estratificadas, con pedesnal (Km. Pons, Grupo Viñales); (3) Calizas masivas, conglomerados calcáreos (Fm. Guasasa, Grupo Viñales); (4) Calizas, lutitas y arcillas calcáreas (Fm. Jagua) (5) Calizas y lutitas (Fm. Azúcar); (6) Areniscas, esquistos, y raramente limolitas (Dogger ?); (7) Esquistos, areniscas y filitas (Fm. San Cayetano); (8) Zonas de agrietamiento intenso; (9) Mantos de sobrecorrimientos asociados con intrusiones (?) de ultrabasitas; (10) Mantos de sobrecorrimiento; (11) Fallas; (12) Fallas probables; (13) Límites de unidades litoestratigráficas (14) Rumbo y buzamiento de las capas; (15) Antiforma; (16) Sinforma.



2. Mapa Geomorfológico del valle de Pan de Azúcar y sus alrededores confeccionado por M. Guerra Oliva con la colaboración de E. Flores Valdés y F. Prado.  
 (1) Pared de la Sierra; (2) Nicho de erosión fluvial; (3) Procesos de pendientes expresados en arroyada difusa; (4) idem en arroyada concentrada; (5) Cobertura aluvial (6) Cobertura eluvial; (7) Cobertura poligénica; (8) Escarpe erosivo; (9) Hogback de cúpula; (10) Hogback de meseta; (11) Plano de inundación y primera terraza fluvial ( $z = 50-100$  ms); (12) Valle de fondo plano; (13) Fondo de depresiones.





3. Mapa Hidrogeológico del valle de Pan de Azúcar y sus alrededores confeccionado por Leslie F. Molerio León y Lorenzo Carvajal Carrazana.

(1) Fuente de caudal autóctono; (2) Cavidad directa; (3) Cavidad directa de caudal autóctono; (4) Cavidad emisiva; (5) Cavidad absorbente; (6) Sima; (7) Sima emisiva; (8) Cavidad emisiva merofósil; (9) Ponor; (10) Siavelle; (11) Dolina; (12) Divisoria superficial; (13) Línea de escurrimiento autóctona; (14) Línea de escurrimiento aloctona; (15) Curva de nivel; (16) Merokarst.

4. La alimentación en el área de kegel se efectúa principalmente a través de formas de absorción conectadas con circuitos de drenaje bastante bien integrados, a juzgar por la red de conducción del aparato cársico drenado por la surgencia de Cimarrones. La descarga de todas las redes subterráneas dan origen al río Pan de Azúcar y la falta de evidencias de zonas de emisión a niveles inferiores del talweg de este río sugieren que éste sea el nivel de base local de un sistema cársico con una zonación hidrodinámica incompleta, esto es, un merocarso.

5. Las particularidades hidrodinámicas de la surgencia de Cimarrones fueron estudiadas a partir de la última rama del hidrograma durante el agotamiento del acuífero. Los parámetros derivados del cálculo permitieron obtener los siguientes estimados de las propiedades físicas del acuífero:

● Coeficiente de agotamiento (K):  
0,995

● Coeficiente de transmisividad (T):  
 $19\,956\text{ m}^2\text{día}^{-1}$

● Coeficiente de almacenamiento (S):  
0,215

● Conductividad hidráulica (T/S):  
 $92\,819\text{ m}^2\text{día}^{-1}$

6. El análisis hidroquímico de las muestras colectadas durante el agotamiento del acuífero drenado por la surgencia de Cimarrones mostró que las aguas subterráneas

emergen del kegel insaturadas de calcita. La pérdida total que las aguas del arroyo Cimarrones sufre a unos 50 m de su primera emergencia, y el recorrido hipogeo correspondiente, muestran en la zona final de descarga, que las aguas han incrementado sus valores de dureza, sales solubles totales, y la concentración de los macroconstituyentes principales, además de la temperatura y la fuerza iónica, con una disminución en el valor del pH, aunque no obstante, las aguas subterráneas abandonan definitivamente el macizo cársico y se incorporan como aguas epigeas al río Pan de Azúcar, insaturadas de calcita.

#### BIBLIOGRAFIA

- 1— Alvarez Sánchez, Humberto: *Geología general y estructural de Pinar del Río*. MS., Archivo, Empresa Hidroeconómica Pinar del Río. circ. restr., 1971.
- 2— Acevedo González, Manuel: *Geomorfología de Sumidero y sus inmediaciones, sierra de los Organos, Pinar del Río, Cuba*. Tecnológica, IX, (3-4): 33-54, 1971.
- 3— Molerio León, Leslie F: *La densidad superficial del carso en las investigaciones ingeniero geológicas, Resumen*, Simp. XXX Aniversario Soc. Espel. de Cuba, 1970.  
*Esquema Geospeleológico preliminar de Cuba, Resumen*, Simp. XXXV Aniversario Soc. Espel. de Cuba, :67-68., 1975.  
*Problemas hidrogeológicos del karst de montañas de Cuba*. Voluntad Hidráulica, (55):37-40, 1981.
- 4— Molerio León, Leslie F. y Gabriel Barceló Carol.: *Las Tinajitas. Un nuevo morfotipo para el karst cubano*. Juventud Técnica (115), :81-85, (1976).
- 5— Thrailkill, John: *Carbonate equilibria in karst waters*. Proc. Dubrovnik Symp. on Karst Water Resources, II :745-771; 1976.