

# **EVALUACIÓN, APROVECHAMIENTO Y PROTECCIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN LA SIERRA DEL ROSARIO, CUBA.**

Autor: **Leslie F. Molerio León**

Instituto: **Instituto de Geofísica y Astronomía,**

E-mail: [leslie@cesigma.com.cu](mailto:leslie@cesigma.com.cu)

## **RESUMEN**

Se determina el potencial hídrico y los recursos aprovechables de los principales acuíferos cársicos de la Sierra del Rosario mediante una adecuada metodología para este tipo de acuífero y se discuten las peculiaridades de la captación de agua subterránea en estos territorios cársicos.

## **ABSTRACT**

The hydric potential and available resources of the main karstic aquifers of Sierra del Rosario are determined applying an adequate methodology for this type of aquifer, and the peculiarity of the underground water capitation for this karstic terrain is discussed.

## **INTRODUCCIÓN**

La elevación del nivel de vida en la montaña, como parte consustancial al desarrollo del país, es el objetivo básico del “Plan Turquino”, tal propósito condiciona *la necesidad de evaluar, cuantitativamente, las reservas de agua subterráneas disponibles en los acuíferos cársicos de montañas, la eventual afectación que su aprovechamiento produciría sobre los recursos hídricos superficiales, y argumentar acerca de las posibilidades de captación de estas aguas.* Las zonas de montaña han sido relativamente poco estudiadas en nuestro país desde el punto de vista hidrogeológico, e históricamente, no se han evaluado, con suficiente detalle, los recursos de explotación de las aguas subterráneas en los acuíferos de estas zonas. Siendo este el objetivo central, se seleccionaron varias cuencas en zonas cársicas de montaña de la Sierra del Rosario, en

Cuba occidental, para las cuales se disponía de información geológica, geomorfológica e hidrológica superficial y subterránea (Fig. 1). Como dato básico para este análisis se utilizaron los caudales base medios mensuales que registran las estaciones hidrométricas ubicadas en los ríos a los que se conectan las cuencas objeto de estudio. Estos datos primarios fueron procesados aplicando el análisis de las curvas de recesión de caudales, definido como el mejor método indirecto para el estudio de las condiciones hidrodinámicas de los acuíferos cársicos. En esta versión se adoptó la ecuación general de Maillet para caracterizar la rama descendente del hidrograma de caudal.

El fundamento teórico del método parte del análisis del vaciado del acuífero durante el período de estiaje donde, de acuerdo con el grado de penetración del río en el acuífero, este es capaz de mantener un determinado caudal debido, exclusivamente, al aporte de agua subterránea. Este puede ser así separado y procesado individualmente. Los datos evaluados en este primer análisis, al tratarse de valores mensuales permiten referirse solamente a la hidrodinámica representada por un sólo subrégimen de agotamiento. El período de recesión promedio evaluado fue de Noviembre a Febrero, es decir, de unos 120 días.

### **Aspectos metodológicos**

Para cualquier nivel de investigación, la evaluación de los recursos de explotación de las aguas subterráneas, en términos de rendimiento seguro, requiere de elevadas inversiones de tiempo y fondos que, en el caso de los acuíferos cársicos, se encarecen sobremanera por la necesidad de aclarar las complejas relaciones entre las componentes del sistema y las variables que estructuran el campo de propiedades físicas.

El karst es un medio acuífero peculiar, un sistema termodinámicamente abierto, que se caracteriza por las siguientes especificidades:

- La anisotropía tridimensional progresiva de las propiedades del campo;
- La jerarquización del espacio que constituye el medio acuífero;

- La existencia de dominios de flujo inherentes a cada espacio;
- Un campo de propiedades físicas estructurado para cada espacio;
- Una fuerte influencia del factor de escala sobre el campo de propiedades físicas;
- La formación y desarrollo de estructuras autorreguladas de disipación de energía;
- La modulación de las respuestas del sistema a los estímulos inducidos natural o artificialmente;
- La dependencia del tiempo de las propiedades que estructuran el campo físico;
- La irreversibilidad del proceso de carsificación y su evolución unidireccional.

Los métodos comúnmente empleados para determinar los recursos explotables de los acuíferos cársicos han sido deducidos bajo una concepción física sustancialmente diferente a las propiedades del karst y que recién hemos expuesto. Ello limita considerablemente su aplicación a los acuíferos cársicos, que constituyen el 65% de la superficie de Cuba y en los que se encuentran poco más del 80% de los recursos de explotación en aguas subterráneas evaluados hasta 1991.

Debe señalarse además, que aproximadamente el 20% de las tierras emergidas del planeta están constituidas por rocas carsificadas que se encuentran en todas las zonas climáticas de la Tierra.

Se trata pues, de un fenómeno universal cuya evaluación debe ser resuelta con métodos de aplicación universal.

En la figura 1 se muestra la distribución de las aguas estudiadas en la Sierra del Rosario.



Figura 1. Mapa de distribución de las áreas estudiadas

### **Análisis hidrodinámico de las curvas de recesión de los acuíferos cársicos**

En trabajos independientes publicados a principios de este siglo<sup>(1)</sup>, dos investigadores franceses, J. Boussinesq (1904) y E. Maillet (1905), dedujeron sendas ecuaciones para caracterizar la rama descendente de las curvas de avenidas en los hidrogramas de los ríos. Tal rama descendente que seguía al pico de las avenidas fue definida por Boussinesq como ajustada a una expresión del

tipo  $Q_t = \frac{Q_o}{(1 + \alpha t)^n}$ , en tanto que para Maillet, tal curva podría ajustarse perfectamente a una

función exponencial decreciente del tipo  $W_t = W_o \exp(-\alpha t)$ , en la que,  $w_t$ : caudal de la fuente al final de un tiempo  $t$ ;  $w_o$ : caudal en un momento  $t_o$  anterior a  $t$ ;  $\alpha$ : un coeficiente adimensional que expresa el retardo en la respuesta a la compensación del caudal, y,  $t$ : tiempo entre  $a_t$  y  $a_o$ .

Suponían estos autores que de ese modo podrían caracterizarse las ramas de descenso de caudal en un río cuando la alimentación cesa, y, como quiera que normalmente esta es una función de las precipitaciones, la ecuación permite definir el caudal del río al final de un tiempo  $t$  cualquiera en que no existe recarga natural.

En principio, tal período fue comprendido entre dos avenidas sucesivas pero, por extensión, la ecuación de Maillet, la más adecuada, comenzó a aplicarse en el análisis hidrodinámico de los caudales de ríos y manantiales en períodos prolongados de bajo o nulo aporte por precipitaciones, esto es, en estiaje, de manera que la importancia del método aumento notablemente, ya que es conocido que de acuerdo con el grado de penetración de un río en un acuífero éste es capaz de mantener un determinado caudal cuando cesa la alimentación por precipitaciones debido, exclusivamente, al aporte de aguas subterráneas. De manera que este gasto, comúnmente denominado caudal base (baseflow) y que interviene, en no pequeña proporción en la composición del hidrograma de los ríos cársicos, puede ser así separado y procesado individualmente.

En el karst, donde la componente subterránea del caudal de los ríos efluentes autóctonos (y aún alóctonos o de caudal híbrido) es por lo general importantísima, aplicar métodos adecuados de análisis hidrodinámico es una cuestión que, sin soslayar su notable valor teórico, resulta fundamental para la correcta evaluación de los recursos de explotación de las aguas subterráneas con una considerable disminución en los costos de las investigaciones. En Cuba, donde la mayor parte de la red fluvial se origina o instala sobre territorios carsificados, disponer de una metodología adecuada para la determinación del volumen de aporte subterráneo es consustancial al objetivo de la hidrología cubana, y si a esto se añade que el 65% de su superficie la componen regiones cársicas en las cuales se encuentra algo más del 90% de los recursos de explotación en aguas subterráneas evaluados hasta el presente, es fácil comprender que la búsqueda de métodos de cálculo de tales recursos responde básicamente a necesidades de orden económico.

El adecuado análisis de las curvas de recesión permite, entre otros aspectos:

- la descomposición, como antes apuntamos, del hidrograma de los ríos,
- la determinación de los recursos de explotación de las aguas subterráneas del macizo drenado por la corriente fluvial objeto de estudio,

- la determinación, como variables regionales, de las componentes más importantes de la estructura del campo físico de los acuíferos cársicos; es decir, los coeficientes de transmisividad, permeabilidad, almacenamiento y difusividad, en cuya definición se excluye el efecto de escala, muchas veces distorsionador, que exhiben estos índices cuando se obtienen de pruebas de bombeo en pozos (aforos);
- el cálculo, bastante preciso, de la infiltración eficaz, de manera que planteando adecuadamente la ecuación de balance, puede determinarse el valor de la evapotranspiración en comarcas sin otro tipo de pérdidas, como por ejemplo, escurrimiento;
- igualmente pueden determinarse, con cierto margen de aproximación, las distancias semirradiales a las divisorias subterráneas;
- bajo condiciones adecuadas pueden discriminarse las componentes de flujo difuso y concentrado, o aún retardado, en el volumen de escurrimiento y, además, los correspondientes régimen de flujo en el acuífero;
- asimismo es posible determinar las componentes de flujo hipodérmico o interflujo, es decir, aquellos caudales organizados en la zona no saturada que toman la forma de avenidas durante la recesión;
- acompañado el registro de caudales con un adecuado muestreo hidroquímico pueden obtenerse conclusiones sobre los mecanismos químico-físicos internos del sistema;
- finalmente, el apropiado procesamiento de la información de caudales en recesión adoptando técnicas de depuración y generalización concomitantes (análisis espectral, métodos de caja-negra, tendencia de pulsaciones, entre los muchos estocásticos, y la generación de curvas sintéticas, entre algunos determinísticos), permite el más acabado conocimiento de la hidrodinámica de un medio heterogéneo y tridimensionalmente anisotrópico como es el caso del karst.

En el caso particular de los acuíferos cársicos, el hidrograma de las fuentes o ríos que los drenan están integrados por varias componentes de flujo, la mayor parte de las cuales se corresponden con aquellas que organizan el escurrimiento subterráneo (hasta el 90% del volumen total de descarga) y una pequeña parte, también a veces controlada por la estructura del campo de propiedades físicas del acuífero en la zona no saturada, que consiste en el llamado flujo hipodérmico, componente que, aunque pequeña, no deja de ser importante para la adecuada interpretación del comportamiento hidrodinámico del acuífero. La curva de recesión o agotamiento (Fig. 2) obedece a una ley exponencial del tipo  $y = (l + \alpha x)^{-n}$  o también,  $y = e^{-\alpha x}$ , siendo  $\alpha$  un coeficiente que caracteriza la entrega de agua a cuenta sólo de los volúmenes contenidos (acumulados) previamente en el acuífero. La expresión deducida por Maillet tiene la siguiente formulación  $Q_t = Q_o \cdot e^{-\alpha(t-t_o)}$ .

Para un tiempo  $t_o$ ,  $Q_e = Q_t$ ,  $\int_{t_o}^{\infty} Q_o e^{-\alpha(t-t_o)} dt = dV$ , e integrando bajo la condición de que  $V = 0$  cuando  $t = \infty$ , entonces:

$$\int_{V(t)}^0 dV = \int_{t_o}^{\infty} Q_o e^{-\alpha(t-t_o)} dt = 0 - V_t \frac{1}{\alpha} Q_o \left[ e^{-\alpha(t-t_o)} \right]_{t_o}^{\infty}, \text{ y de ahí, } V_t = \frac{1}{\alpha} Q_o \left[ 0 - e^{-\alpha(t-t_o)} \right], \text{ o lo que es igual, } V_t = \frac{Q_o}{\alpha} e^{-\alpha(t-t_o)}, \text{ y como quiera que } Q_t = Q_o e^{-\alpha(t-t_o)}, \text{ se concluye que, } V_t = \frac{Q_t}{\alpha} \text{ y por tanto, } \alpha = \frac{Q_t}{V_t}, \text{ en la que } \alpha \text{ es el coeficiente de agotamiento, que a la vez, puede obtenerse de la curva de recesión de manera tal que equivale a } \alpha = \frac{\log Q_o - \log Q_t}{0,4343(t-t_o)}$$

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Cálculo de los recursos de explotación

Como  $V_t = Q_t / \alpha$ , luego entonces es lícito afirmar que haciendo  $t = 0$ , (24)  $V_o = Q_o / \alpha$  y, como quiera que los recursos de explotación, en términos de reservas reguladoras, no son más que la diferencia de volúmenes entregados en un lapso  $t$  cualquiera, tales recursos ( $W_t$ ) equivalen

a  $W_t = V_o - V_t$ , lo que es igual a  $W_t = Q_o / \alpha - Q_t / \alpha$ , para un sólo subrégimen, claro está.

Para varios subregímenes:

$$W_t = \left( \frac{Q_{o1}}{\alpha_1} + \frac{Q_{o2}}{\alpha_2} + \frac{Q_{o3}}{\alpha_3} + \frac{Q_{o4}}{\alpha_4} \dots \dots \dots \frac{Q_{on}}{\alpha_n} \right) - \frac{Q_t}{\alpha_t}$$

siendo  $Q_t / \alpha_t = V_t$ , o sea el volumen final contenido en el acuífero. En cada caso, los subíndices indican los valores correspondientes a cada subrégimen. Los métodos que se basan en el análisis del hidrograma son ciertamente los más sencillos y se derivan fácilmente comparando los volúmenes drenados o iniciales en cada subrégimen. Aquí se observará invariablemente que  $V_{o1} < V_{o2} < V_{o3} \dots \dots \dots < V_{on}$ , o también que,  $\Delta V_1 < \Delta V_2 < \Delta V_3 \dots \dots \dots < \Delta V_n$ .

Es importante destacar que las reservas reguladoras en el karst de montaña son variables que dependen del tiempo. Esto es, que no hay valores fijos de  $W_t$  en el karst, lo que obliga a reconsiderar seriamente las cifras adoptadas en el balance nacional para muchos acuíferos cársicos. Tal variabilidad, función a su vez de la del campo T y S, del estado inicial, la presencia de régimen transitorio (no permanente), durante gran parte del agotamiento debido a la variabilidad en la distribución interanual del escurrimiento y las precipitaciones, estas fuente fundamental de la alimentación de los acuíferos, constituye, en conjunto, un indicador preciso de la heterogeneidad del macizo y del diferente grado de influencia de las componentes de flujo en el sistema. Una gran ventaja adicional presenta, además, el cálculo de  $W_t$  por este método, y es que los valores así obtenidos corresponden a volúmenes drenados bajo el exclusivo control del campo físico del acuífero durante el estiaje, y por ello representan los caudales seguros de rendimiento del acuífero, lo que equivale a los volúmenes permisibles de explotación. Son entonces, por excelencia, los recursos de explotación del acuífero.

Los karsts de montaña de Cuba<sup>(2,3,4,5)</sup> constituyen, en su mayor parte, importantes zonas acuíferas. Algunos años atrás, se expuso la problemática hidrogeológica de estas áreas cársicas que, exceptuando estudios esporádicos, permanecen sin evaluar hidrogeológicamente. Como se expresó en una oportunidad, gran parte de estos territorios no están siquiera explorados detalladamente, si se exceptúan algunos trabajos espeleológicos y geomorfológicos. El



comportamiento hidrodinámico de los karsts de montaña presenta características particulares específicas, sustancialmente distintas, físicamente, de cualquier otro relieve cársico. Es por esto que no le son aplicables conceptos ni técnicas de exploración y del cálculo de los índices del campo de propiedades físicas y de recursos y reservas que se aplican en las áreas de acuíferos cársicos de llanura. Los karsts de montaña de Cuba presentan las siguientes particularidades:

1. Desarrollo de flujos importantes, tanto autóctonos como alóctonos, organizados subterráneamente, eventualmente individualizados, pero comúnmente vinculados, cuyas zonas de alimentación y conducción y, a veces, aún las propias zonas de descarga no son perfectamente distinguibles.

2. A menudo se presenta una zona de acumulación subterránea alimentada predominantemente por caudales autóctonos que, al parecer, constituyen sus más importantes reservas; sus mecanismos de drenaje no están claros y pueden ser tanto de escalonamiento vertical como de circulación lateral, y donde sus descargas pueden aparecer concentradas, o también difusas y relacionadas morfológicamente de modo diverso, generalmente controlados por la posición hipsométrica de niveles de base locales. De igual modo, parece que las zonas de acumulación drenan, en ocasiones, por sistemas de grietas acuíferas cuya respuesta a los estímulos de recarga del depósito son muy variables.

3. Aunque en los karsts de montaña se encuentra generalmente una vertiente absorbente y otra emisiva, vinculada la primera con los cauces fluviales superficiales que inciden en la serranía y la segunda con las emergencias de tales caudales, también se encuentran vertientes emisivas desvinculadas de zonas de absorción alóctona en el propio macizo cársico, así como cauces superficiales instalados en el contacto entre el karst y la roca no carsificable que imprimen al relieve un fuerte carácter fluviocársico transicional para el que además, debe estipularse otro modelo hidrogeológico.

4. Las variedades en la tipología hidrogeológica se establecen a partir de *la ausencia de niveles acuíferos continuos*, tratándose tanto de bolsones acuíferos como de grietas

impenetrables y canales transitables, saturados permanentemente o sólo de modo temporal, a diferentes niveles, que pueden encontrarse aislados o conectados a redes mayores, a veces alóctonas, que los caracterizan como un merokarst.

5. Lo anterior presenta ciertas ventajas en cuanto a la investigación hidrogeológica regional, que se manifiesta en la delimitación de las técnicas de estudio de este medio; así, los cálculos de reservas pueden efectuarse a partir de registros sistemáticos de los caudales de descarga y absorción del macizo y cada macizo montañoso puede ser considerado como un sistema o un aparato cársico particular, de acuerdo con los resultados de la exploración e investigación geoespeleológica integral, y como tales, individualizados y evaluados con notable independencia del resto del karst de montaña vecino.

6. En cuanto a la acuosidad de las rocas fisuradas no cársicas que forman parte generalmente de las áreas de karst de montaña, no existen pruebas que permitan siquiera juzgar sobre su eventual potencial. Constituidas por hiperbasitas muy fisuradas, cabe la posibilidad -por analogía- de que constituyan fuentes acuíferas, cuyo papel en la distribución de la recarga natural del karst de montaña, no es conocida. Los depósitos aluviales o lacuno-palustres presentan una acuosidad muy variable. Los primeros son aprovechados localmente, sin constituir importantes horizontes acuíferos, en tanto los segundos presentan posibilidades más limitadas de desarrollo de captaciones dada la fina granulometría de los sedimentos.

### **Potencial hídrico y recursos aprovechables**

El potencial hídrico de las cuencas de montaña fue calculado en términos de reservas reguladoras y rendimiento seguro, expresados en  $\text{Hm}^3/\text{año}$ , aplicando el método de las curvas de recesión de caudal al hidrograma hiperanual registrado en cada una de las estaciones hidrométricas.

Las **reservas reguladoras** fueron obtenidas a partir de datos mensuales de caudal. El **cálculo del rendimiento seguro** se efectuó, a partir de datos diarios, los 25 cierres para los que se disponía de registros diarios de caudal e información adicional, derivada de trabajos de levantamiento

hidrogeológico. Para estos cierres se obtuvieron sus valores mínimos, medios y máximos. Los **valores mínimo y máximo del rendimiento seguro representan los caudales base extremos de la serie cronológica estudiada; los valores medios constituyen el promedio simple de toda la serie**. Debe destacarse que este rendimiento seguro medio viene definido por los aportes, que se producen al caudal base, del drenaje subterráneo de las cavernas y una componente que oscila entre el 25 y el 60 % del escurrimiento subterráneo aportado por las grietas<sup>(6,7)</sup>.

En la figura 2 se muestran los indicadores de una curva tipo de agotamiento de caudales o niveles.

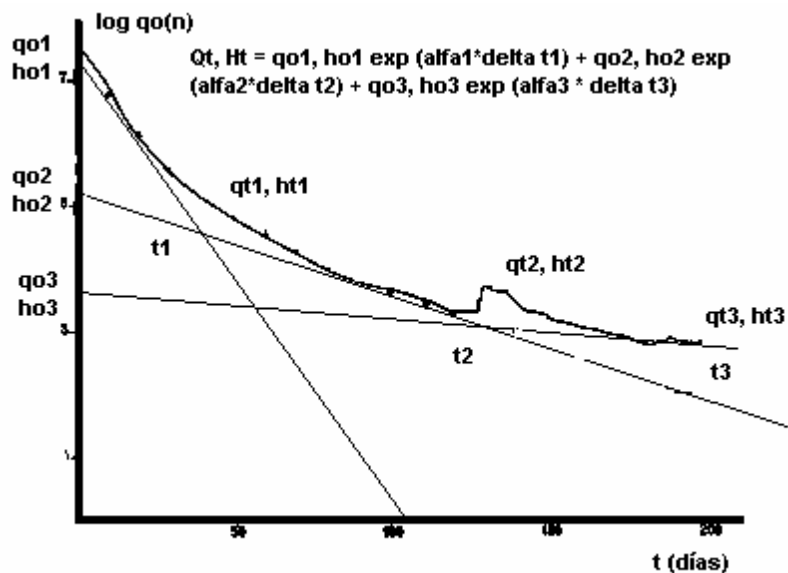


Figura 2. Indicadores de una curva tipo de agotamiento de caudales o niveles

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Algunos de los resultados obtenidos se resumen en la Tabla 1.

**Tabla 1. Potencial hídrico y recursos aprovechables de los acuíferos cársicos de la Sierra del Rosario.**

Cuenca	Cierre	Área Km <sup>2</sup>	Período Evaluado años	Reservas Reguladoras Hm <sup>3</sup> /año Mínimas	Rendimiento Seguro Hm <sup>3</sup> /año Mínimo
Pan de Azúcar	II Congreso	38	1963- 89 1969- 88	16.82 5.51	2.21 0.03
Guacamaya	La Lima	40	1968- 90	5.48	0.38
Caimito	El Central	70	1981- 86	5.70	
San Diego	Los Gavilanes	38	1985- 91	2.67	
Los Palacios	El Rosario	40	1968- 90	2.09	
Bacunagua	Sto Domingo	53	1962- 90	3.69	0.47
Taco Taco	El Jardín	25	1963- 76	1.73	3.78
Santa Cruz	Santa Ana	30	1964- 79	3.21	0.47
San Cristóbal	La Campana	100	1966- 87	2.03	0.95

En las cuencas ubicadas en la Sierra del Rosario, tales como San Diego, Los Palacios, Bacunagua, Taco Taco, Santa Cruz y San Cristóbal, la descarga de los caudales autóctonos se efectúa hacia las redes fluviales colectoras labradas sobre las superficies no carsificables. La alimentación, movimiento y descarga no están bien definidas geomorfológicamente, por lo que su localización no está clara, aunque existe una importante componente de alimentación a través de simas verticales o subverticales que contactan con la red subterránea principalmente desarrollada al nivel de los valles superficiales. De igual modo las relaciones de alimentación alóctona y autóctona son complejas, ya que en general puede considerarse un karst suspendido. Sin embargo, la red cársica funciona como recarga a la zona de drenaje superficial. La red superficial localmente está bien desarrollada.

### **Particularidades de la captación de agua subterránea en la montaña**

Por lo común, *las aguas subterráneas en la montaña representan un potencial limitado a los efectos de emprender su captación a gran escala.* Ello se debe a que los acuíferos de montaña son reducidos y de limitado espesor, no forman grandes sistemas interconectados y son sumamente dependientes de las variaciones en la recarga natural. La contribución del drenaje subterráneo al escurrimiento total calculada para los territorios aquí estudiados es la sumatoria de la contribución de numerosos aparatos cársicos, a veces aislados, que constituyen, por ello,

sistemas de flujo locales. En consecuencia, el desarrollo de captaciones en estas regiones debe atender, ante todo, esta particular característica.

Las **formas de captación más comunes** de agua subterránea en las zonas de montañas cársicas de Cuba son aprovechamiento de manantiales (con o sin regulación artificial), aprovechamiento directo de los caudales fluviales (tomas en los ríos), aprovechamiento de los lagos subterráneos en cavernas y pozos criollos, habida cuenta de que, históricamente, los aprovechamientos de agua subterránea han resultado casi totalmente artesanales y destinados a la satisfacción de una demanda mínima, por lo común, no más allá de las necesidades domésticas. Casos excepcionales, por ejemplo, lo constituye la presa del resolladero del río Bacunagua, en La Tranquilidad.

#### ***Aprovechamiento de manantiales***

La efectividad de la captación depende del tipo de manantial. Algunos fracasos notables de aprovechamientos subterráneos se deben a confundir surgencias con estavelas o con “tanques” en las vertientes absorbentes de las montañas. En este sentido, las formas más apropiadas resultan las fuentes vaclusianas de nivel de base, las surgencias de caudal autóctono de nivel de base y los lagos de los “trop-pleins” vinculados a sistemas mal drenados, caracterizados por su elevada inercia e importantes volúmenes almacenados. Las construcciones del tipo de “cajas de agua”, muy comunes, deben prever, en el caso de las fuentes vaclusianas, las descargas violentas e instantáneas promovidas por aguaceros torrenciales de respuesta rápida

#### ***Aprovechamiento directo de los caudales fluviales (tomas en los ríos)***

Estas captaciones son comunes en los valles de fondo plano, generalmente con cobertura arcillosa. En tales casos, las capacidades de extracción son mayores y se destinan al riego de pequeñas parcelas y, parcialmente al abastecimiento doméstico. Estas tomas presentan, como inconveniente, que no siempre pueden asegurar una adecuada calidad de las aguas, debida a fenómenos de turbidez y contaminación bacteriológica. Por lo común, estas aguas presentan baja

mineralización y, cuando predomina la alimentación alóctona desde zonas terrígenas, presentan bajo contenido de calcio y magnesio.

### ***Aprovechamiento de los lagos subterráneos en cavernas***

En cavernas de fácil acceso, es común que parte del abastecimiento doméstico se realice a partir de la colecta manual de aguas de percolación almacenadas en los lagos subterráneos, tanto del tipo de “gours” (o represas naturales) como de depósitos remanentes de avenidas o de afloramientos locales del nivel de las aguas subterráneas. La primera y la última suelen ser aguas de excelente calidad físico-química y bacteriológica, no así las segundas, sobre todo cuando están vinculadas a avenidas.

### ***Captaciones mediante pozos criollos***

Esta práctica es común en valles de fondo plano, en algunos fondos de poljes o uvalas y en la corteza de intemperismo de los depósitos de acarreo o derivados de las rocas no carbonatadas. Sus caudales suelen ser exigüos, capaces de satisfacer pequeñas demandas domésticas. Los pozos son poco profundos, de no más de 5 metros y de gran diámetro. Aprovechan aguas de infiltración y, localmente aguas de acuíferos subálveos o colgados de muy poca potencia. Su calidad es muy variable, aunque por lo general son aguas de muy baja mineralización, susceptibles de contaminarse rápidamente.

Las captaciones mediante pozos tubulares son exitosas sólo cuando logran aprovechar los acuíferos calcáreos de fondo de valles que no hayan atravesado fases lacustres durante su evolución hidrológica. En este caso, los materiales finos de la sedimentación lacunar suelen sellar los conductos cársicos convirtiendo el desarrollo de los pozos en una tarea muy poco efectiva.

Durante los últimos años se han realizado investigaciones aplicadas en la mayoría de las cuencas cársicas de montaña de Cuba. Como resultado de estos levantamientos pueden argumentarse

algunas particularidades para asumir la captación de las aguas de montaña en los karsts de montaña.

**Las captaciones en relieves cársicos** de montaña deben realizarse directamente sobre el nivel de descarga en los sistemas de flujo, tanto local como regional. Estas fuentes presentan el caudal base o de estiaje esencialmente autóctono de los acuíferos cársicos. Es particularmente importante conocer el área de alimentación y los recursos aprovechables de la fuente que va a ser explotada. Como premisa debe conocerse la relación hidráulica del manantial con el acuífero, ya que bolsones colgados o redes desvinculadas, ocasionalmente activas, no son portadoras de caudales permanentes y pueden no drenar en los períodos de seca.

**Para las superficies de contacto o fluvio cársicas** se deben tener en cuenta las relaciones hidráulicas de la red fluvial superficial, alimentada por el acuífero; la acuosidad potencial de los sedimentos, prácticamente impermeables en relación al karst que rellenan los valles en contacto; así como el eventual estancamiento o acumulación de agua superficial o de rápida infiltración en cavernas de sapeamiento lateral, colgadas o desvinculadas de los acuíferos; que pueden dar falsas observaciones del régimen de flujo en los karsts de montañas.

**Las vertientes absorbentes** de los valles fluvio cársicos, al ser las zonas de alimentación de estos sistemas acuíferos, no constituyen zonas de captación del agua subterránea

Un aspecto especialmente importante a tomar en consideración es que la captación de las aguas subterráneas en los acuíferos cársicos de montaña reduce -o puede reducir- el gasto que, en la actualidad, se capta en las estaciones hidrométricas de la red de control y monitoreo del escurrimiento líquido superficial de los ríos que drenan estos acuíferos o es almacenado o derivado por obras hidrotécnicas (presas, canales, hidroeléctricas) localizadas aguas abajo. Por tal motivo el volumen total drenado por el acuífero, tiene que ser separado del volumen superficial con precisión suficiente para evitar resultados indeseables.

## **CONCLUSIONES**

En los acuíferos estudiados de la Sierra del Rosario (Pan de Azúcar, Guacamaya, Caimito, San Diego, Los Palacios, Bacunagua, Taco Taco, Santa Cruz, San Cristóbal), fueron determinados en el período de estiaje valores mínimos de Reservas Reguladoras del orden de 1.73-16.82 Hm<sup>3</sup>/año y de Rendimientos Seguros del orden de 0.03-3.78 San Cristóbal.

Las principales formas de captación de las aguas subterráneas en estas zonas montañosas, fundamentalmente de tipo artesanal, son: aprovechamiento de manantiales, aprovechamiento directo de los caudales fluviales (tomas en los ríos), aprovechamiento de los lagos subterráneos en cavernas, captaciones mediante pozos criollos.

Un aspecto especialmente importante a tomar en consideración es que la captación de las aguas subterráneas en los acuíferos cársicos de montaña reduce -o puede reducir- el gasto que, en la actualidad, se capta en las estaciones hidrométricas de la red de control y monitoreo del escurrimiento líquido superficial de los ríos que drenan estos acuíferos o es almacenado o derivado por obras hidrotécnicas (presas, canales, hidroeléctricas) localizadas aguas abajo. Por tal motivo el volumen total drenado por el acuífero, tiene que ser separado del volumen superficial con precisión suficiente para evitar resultados indeseables.

## **RECONOCIMIENTOS**

En diferentes etapas de trabajo, el autor recibió la inestimable colaboración de los siguientes colegas, M. Guerra, E. Flores, C. Bustamante, A. Menéndez, M. Labrada, E. Rocamora, C. March, P. González, L.R. Díaz y E. Planos. También desea expresar su reconocimiento a Ana, su compañera.



## BIBLIOGRAFIA

1. Borevskii, B., B. Samsonov, L. Yazvin (1979): *Metódica para la determinación de los parámetros de los acuíferos por datos de aforos* (en ruso). Editorial Nedra, Moscú, 328 p.
2. Kiraly, L. (1975): "Rapport sur l'état actuel des connaissances dans le domaine des caracteres physiques des roches karstiques." In/ Burger, A. & L. Dubertret: *Hydrogeology of Karstic Terrains*. Ass. Internatl Hydrogeolo., Paris: 55-67.
3. Menéndez Gómez, Ambar (1994): "Hidrogeología cársica de las cuencas de los ríos Taco Taco, Santa Cruz y San Cristóbal." En *Tesis. Archivo Instituto Nacional Recursos Hidr. Circ. Restr.*, La Habana, 85 p.
4. Molerio León, Leslie F. (1981): "Problemas hidrogeológicos del karst de montaña de Cuba." En *Voluntad Hidráulica* (55):37-40.
5. Molerio León, Leslie F., E. Flores, M. Guerra Oliva (1981): "Contribución a la geomorfología e hidrogeología cársica de la Sierra del Rosario, Pinar del Río, Cuba." En *X Jor. Cient.Inst.Geol.Pal.*, Academia de Ciencias Cuba: 87-90.
6. Piñera Caso, J., C. March, L. Molerio (1982): "Análisis de un modelo estadístico para la regionalización de las transmisividades en un polje." En *Col. Internac. Hidrol. Cársica de la Región del Caribe*. UNESCO, La Habana, 201-221.
7. Yazvin, L (1972): "Certidumbre de los cálculos hidrogeológicos durante la evaluación de las reservas de explotación de las aguas subterráneas." (*en ruso*). VSEGINGEO, Moscú, 149 p.