

ESTUDIO HIDROGEOQUIMICO DE LAS AGUAS CARSIICAS
DE LA CUENCA DEL RIO CUYAGUATEJE

Fagundo, J.R.
Valdés, J.
Pajón, J.

224
12
251

Introducción

Aunque un gran número de valiosos estudios relacionados con la geoquímica y química-física de las aguas cársticas 1-9, han sido efectuados en los últimos años por numerosos investigadores, fundamentalmente en países de clima templado 10-11, en regiones tropicales, estos estudios son muy escasos. Cabe destacar los realizados en Jamaica por Fincham y Ashton 12, Brown y Ford 13; en México por Back y Hanshaw 14 y por Harmon 15 y en Venezuela por Gascoigne 16.

En Cuba los primeros trabajos sobre la química-física de las aguas carbonatadas se llevaron a cabo en la región de San Antonio de los Baños 17-18, Provincia Habana y con posterioridad han sido extendidas a la cuenca del río Cuyaguatzeje 19-20, en la Sierra de los Organos y la región del Pan de Guajaibón 21, en la Sierra del Rosario, ambos en la Provincia de Pinar del Río.

El objetivo de este trabajo es presentar un resumen de los estudios realizados en la Sierra de los Organos, durante una serie de campañas de muestreo sistemáticas efectuadas en período 1978-1980, que abarcaron épocas de lluvia y de seca alternativamente.

Geografía, geología e hidrogeología de la región

La cuenca del río Cuyaguatzeje (ver figura 1) ocupa un área de 842 km² aproximadamente y se encuentra comprendida entre las Sierras de Celadas e Infierno por el NE, la Sierra de Guane y la porción más oriental de la Llanura de Guanacabibes por el SW, limitando por el norte y el sur con las Alturas de Pizarras del norte y del sur respectivamente. Además, forman parte de esta zona los macizos carbonatados de Quemados, Cabezas, Sumidero, Resolladero, Pesquero, Mesa, San Carlos y Guane.

En la porción carbonatada es característico el desarrollo de un tipo de carso tropical típico, caracterizado por una morfología de carso cónico y de torres (Kegel y Turnkarst) además aparecen otras formas exocársticas tales como poljes, uvalas, hoyos de montaña (dolinas), simas, campos de lapiaz, etcétera. Las formas endocársticas están representadas por cavidades subterráneas que aparecen distribuidas en algunas localidades, hasta con cinco niveles de cavernamiento 22, ocupando algunos de ellos, extensiones superiores a 20 kms 23-24.

Esta morfología, ha sido condicionada por varios factores: estructurales, litoestratigráficos, hidrogeológicos, climáticos, etc. Estructuralmente, la cuenca está limitada en ambos flancos por las Alturas de Pizarras, unidades arcillo-arenoso-pizarrosas de la Formación San Cayetano, del Jurásico Inferior y Medio. Los macizos cársicos, que constituyen la porción central de la cuenca, están formados por calizas de las formaciones: Jagua, Guasasa, Valle de Pons y Ancón, que van desde el Jurásico Inferior hasta el Paleógeno. También en esta región central aparecen capas terrígenas de la Formación Pica Pica, también del Paleógeno 25, así como sedimentos poligénicos 26 de cobertura, originados durante el Cuaternario.

La orientación de estas unidades se encuentran alterada por la ocurrencia de intensos procesos de cabalgamiento, como consecuencia del deslazamiento diferencial y transporte tectónico de rocas, ocurridos en el Eoceno 27. Como tendencia general, las unidades tectónicas van sumergiéndose gradualmente en la dirección suroeste.

El clima de la región se caracteriza por un régimen alto de lluvias, que oscilan entre 1600 y 1800 mm anuales, las cuales caen fundamentalmente en el llamado período lluvioso, comprendido entre los meses de mayo a octubre (78-80% de las lluvias). La humedad relativa media es de 77% y las temperaturas medias anuales ocurren entre 21.8 y 24.9°C 28.

La cuenca en su conjunto está integrada por un sistema de drenaje superficial y subterráneo. En la parte superior y media, el drenaje superficial está constituido por ríos y arroyos procedentes de las pizarras, muchos de los cuales, después de recorrer los valles de contacto, penetran en los macizos carbonatados a través de cuevas transfluentes, integrándose nuevamente el drenaje subaéreo. En este recorrido hipogeo, estos cursos incrementan notablemente sus caudales producto del aporte autóctono propio de los macizos cársicos.

Además, existen otros arroyos superficiales que tienen su origen en los macizos carbonatados, a partir de exsurgencias y manantiales, algunos de los cuales poseen caudales considerables y realizan una importante contribución al balance hídrico de la región. La emisión de estas aguas captadas por los macizos ocurre en unos casos a nivel de los talwegs. En otros casos, estas aguas alcanzan la zona de circulación profunda y la emisión se produce en exsurgencias situadas en la porción media de la cuenca, fenómeno asociado a la tectónica regional.

En el tercio inferior de la cuenca, el relieve está constituido por llanuras aluviales, fluvio-marinas y deltáicas con espesores variables de sedimentos, también de edad Cuaternaria, donde predomina el cuarzo. Por debajo de estos sedimentos, yacen calizas arrecifes de edad Miocénica 29 en las que se desarrolla un acuífero grandemente influenciado por la interacción con el mar.

Todo el conjunto hidrogeológico de la cuenca, constituido por el drenaje superficial y subterráneo juega un papel importante en los procesos hidrogeoquímicos que ocurren en la región y conjuntamente con los demás factores geodinámicos, han influido decisivamente en la génesis y evolución de los fenómenos cársicos.

Muestreo y Métodos Analíticos

Los sitios muestreados (ver figura 2), son representativos de los siguientes medios geológicos e hidrogeológicos: A-sumideros y arroyos no cársicos (15); B-aguas de la zona de aeración de las emergencias cársicas (7); C-resurgencias (6); D-arroyos y ríos superficiales cársicos (3); E-exsurgencias de la zona de saturación (8); F-exsurgencias de la zona de saturación y circulación profunda (6). Además, se tomaron muestras (agosto 1981) en tres pozos (P) ubicados en la desembocadura del río Cuyaguaje.

Los iones HCO_3^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- fueron determinados en el campo mediante las técnicas descritas en Markowicz y Pulina (30). También se determinó in situ la temperatura, la conductividad, el pH y el caudal. Los restantes iones (Na^+ , K^+ , SO_4^{2-} , NO_3^{2-}) se determinaron en el laboratorio.

Los parámetros medidos en las diferentes campañas fueron procesados mediante un programa escrito en Fortran IV(17) el cual determina la dureza la presión parcial de CO_2 y el índice de saturación de la calcita (RSC).

Resultados y Discusión

Valores medios y variación estacional de índices y parámetros químico-físicos.

En la Tabla 1 se presenta un resumen de los resultados obtenidos durante las campañas de muestreo estudiadas sistemáticamente (1978-1980) con el objetivo de caracterizar los distintos tipos de aguas mediante sus propiedades químico-físicas. También se incluye

aguas del tipo P, tomadas en verano de 1981 en pozos situados próximos a la desembocadura. En las figuras 3 y 4 se muestran gráficamente los resultados de la variación estacional (períodos lluvioso y seco), de la temperatura (T) dureza (D) la conductividad (SPC), el pH, el logaritmo de la presión de CO_2 ($\log p\text{CO}_2$) y el índice de saturación de la calcita (RSC).

Las aguas del tipo A han sido tomadas en sitios de la zona no cársica y aunque corresponden a arroyos que fluyen principalmente sobre sedimentos arcillo-arenoso, en ocasiones interesan calizas que afloran en ventanas tectónicas. En general estas aguas (ver Tabla 1), se caracterizan por altos valores de T, $\log p\text{CO}_2$ y bajos valores de D, SPC, HCO_3^- , pH y RSC. Los valores de este último índice indican que estas aguas permanecen siempre insaturadas.

En la figura 3 se observa (A2), una respuesta estacional de los parámetros e índices y una correlación directa entre D, SPC y HCO_3^- , con máximos en los meses de seca, en que las temperaturas son más bajas y las precipitaciones más escasas (patrón de fluctuación de tipo M).

Las aguas de tipo B (figura 3, B-2) fueron tomadas en los gours y sistemas de "duchas" o de goteos lentos, en varias cavidades de los macizos carbonatados de las Sierras del Resolladero y de San Carlos. Son representativas del drenaje autóctono de la zona de aeración, principalmente, de las aguas de infiltración lenta.

Estas aguas (ver Tabla 1), poseen bajos valores de T, $\log p\text{CO}_2$ y relativamente altos valores de D, SPC, HCO_3^- , pH y RSC. Los altos valores de este índice indican que por lo general las aguas en las cavidades llegan a sobresaturarse. Este tipo de agua también presenta una respuesta estacional de los parámetros, aunque en relación a la temperatura la fluctuación es menor. Por otro lado la D, SPC, HCO_3^- y el pH presentan en la mayoría de los casos, sus valores máximos en los períodos lluviosos y los mínimos en los de seca (patrón de fluctuación tipo W).

Este comportamiento puede explicarse por el efecto de variación de la temperatura, que experimentan las aguas al penetrar verticalmente en los macizos en las diferentes épocas del año. En los meses de calor las aguas se enfrían en el interior de estos, mientras que en los meses fríos por el contrario se calientan.

Las aguas del tipo C, tomadas en las resurgencias (ver Tabla 1 y figura 3, C-4), aunque de origen alóctono, están influenciadas por el drenaje autóctono. Los valores de los parámetros suelen ser intermedios entre los correspondientes a las aguas de los tipos A y B y el patrón de fluctuación estacional de las mismas, suele presentarse como un híbrido de sus patrones correspondientes, tendiendo a parecerse más a uno u otro en dependencia del peso que ejerza uno u otro tipo de drenaje.

Las aguas del tipo D, fueron tomadas en los grandes ríos de la zona cársica. Poseen un patrón de variación estacional (figura 4, D-4), semejante al de las aguas superficiales no cársicas con valores mucho más altos de los parámetros e índices (Tabla 1). La presión de CO_2 es baja y el RSC indica que la mayor parte del año estas aguas permanecen sobresaturadas.

Las aguas del tipo E incluyen pozos, manantiales y exurgencias que emergen desde la zona de saturación de los acuíferos. Una parte de ellas presentaron fluctuaciones estacionales de la temperatura (véase el valor del C.V.T. en la Tabla 1). Otras, como la que se ilustra en la figura 4, E12, mostraron una fluctuación despreciable. Se encontró además, que en los casos en que la fluctuación de este parámetro es pequeña, son más altos los valores de D, SPC y HCO_3^- . El patrón de fluctuación estacional resultó ser semejante al de las aguas del tipo A y el valor de RSC por lo general arrojó valores próximos a la saturación.

Las aguas del tipo F fueron tomadas en emergencias y un pozo, situados en la parte media de la cuenca, donde ocurre un sistema de fallas regionales, poniéndose en contacto medios de distintas naturaleza geológica. Un aspecto interesante de estas aguas lo constituye los relativamente altos valores de T, SO_4 , HCO_3^- , SPC y D (ver Tabla 1), unido a altos valores de $\log \text{pCO}_2$, así como la poca fluctuación estacional de la temperatura (ver Tabla 2, figura 2, F-1). Estos elementos permiten inferir la presencia de una componente de origen relativamente profundo en este tipo de agua. Excepto la temperatura, cuyos coeficientes de variación fueron los más bajos (ver Tabla 1), los restantes parámetros presentan respuesta estacional y su patrón de fluctuación muestra cierta semejanza con el de las aguas del tipo A. Sin embargo, no se encontró como en casos anteriores, una buena correlación entre la dureza y la conductividad, y sí entre la conductividad y la raíz cuadrada de la fuerza iónica ($\sqrt{\mu}$), debido a los altos contenidos de SO_4^{2-} , lo que indica que estas aguas no son carbonatadas, sino carbonatado-sulfatadas.

Las aguas del tipo P (ver Tabla 1), tomadas en pozos próximos a la desembocadura del Cuyaguaje, donde existe un acuífero desarrollado en calizas Miocénicas presentaron valores muy elevados de D, SPC, HCO_3^- , RSC. Además alcanzaron altos contenidos de los iones Na^+ , K^+ , Cl^- y SO_4^{2-} , lo que refleja la influencia de la interacción marina. Teniendo en cuenta los bajos valores de la relación $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ (ver Tabla 2), se infiere que las mismas se encuentran parcialmente dolomitizadas.

La relación $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ también presentó variación estacional, registrándose por lo general, los mayores valores en los períodos lluviosos. Los valores medios de este índice fueron superiores a la unidad. Los valores más elevados corresponden a emergencias ubicadas en las Sierra del Infierno (E1 y E2), lo que sugiere diferencia en la composición y la litofasia de la caliza en esa zona. Las del tipo P como ya se ha indicado poseen los valores más bajos.

Comportamiento de los parámetros e índices químico-físicos de las aguas en su curso a través de los aparatos cársticos

Para facilitar la interpretación del proceso de disolución de los macizos carbonatados de la cuenca del río Cuyaguaje, fueron seleccionados los resultados obtenidos en puntos de muestreos representativos de los diferentes medios hidrogeológicos, los cuales se ilustran en las figuras 5-8. En estos sitios se estudió el comportamiento de los siguientes parámetros: presión de CO_2 en equilibrio, pH, dureza, contenido de ion SO_4^{2-} , temperatura y RSC.

En la figura 5 se observa la evolución de las aguas del arroyo Santo Tomás en su curso hipogeo a través del macizo calizo de la Sierra de Quemados (A1-sumidero, C1-resurgencia). En la entrada de este sistema, las aguas poseen un relativamente elevado valor de pCO_2 , como resultado de la interacción de los productos, de descomposición de la flora presente en los suelos arcillo-arenoso-pizarroso. A la salida del sistema se aprecia una disminución de 1.4×10^{-3} atmósferas, como consecuencia del consumo de CO_2 en el medio carbonatado, que da lugar a un incremento de las especies HCO_3^- , CO_3^{2-} , OH^- . Esto se refleja en el incremento del pH y la dureza en 0.4 unidades y 30 ppm respectivamente. El ion SO_4^{2-} prácticamente no varía, mientras que la temperatura decrece 2°C , el RSC se incrementa en 0.7 unidades, disminuyendo así algo su grado de insaturación.

En la figura 6 se muestra el comportamiento de las aguas muestreadas en la Sierra de Cabezas y los valles adyacentes (A6- sumidero y C-6 resurgencia del arroyo Candeleró y E-7 pozo "El Cuayabo").

En relación al río transfluente, se aprecia una variación de los parámetros químico-físicos, a la entrada y salida del sistema, carbonatado, similar a la observada en el arroyo Santo Tomás. Sin embargo, en este caso, las aguas antes de penetrar en el maciso ya se encuentran sobresaturadas, haciéndose aún más sobresaturadas en la salida. Este comportamiento pudiera atribuirse a que las mismas, en su paso por el polje "Hoyo Caliente", interactúan con rocas de la Formación Pica Pica, que poseen intercaladas calizas muy trituradas, lo que facilita el proceso de disolución.

En el pozo El Guayabo se aprecia un alto contenido de CO_2 , un relativamente bajo pH, la ausencia de iones SO_4^{2-} , un alto índice de sobresaturación; así como un elevado valor de dureza (el mayor de los puntos muestreados en la cuenca). Estos resultados reflejan un prolongado contacto de estas aguas con las rocas carbonato-terrágenas de la Formación Pica Pica.

En la figura 7 se presenta el comportamiento de varios puntos de muestreo situados en la Sierra del Resolladero: (B11- gours en la Cueva de los Soterráneos, en un nivel de cavernamiento superior, B-1-10- degoteo y gours en la Cueva de Pio Domingo, en un nivel de cavernamiento inferior, E-6- Pozo natural situado en la dolina "Hoyo del Agua" y E-8 surgencia del arroyo Los Ñames, de origen autóctono).

En general no se observan diferencias significativas entre las propiedades de las aguas de degoteo (B1-B4) y de gours (B5-B-10). No obstante, se aprecia que en el nivel de cavernamiento superior el contenido de CO_2 es mayor que en el inferior, mientras que los valores de pH, dureza y el grado de saturación se incrementan en el nivel inferior.

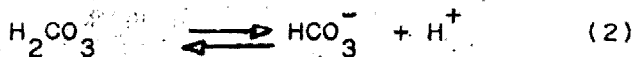
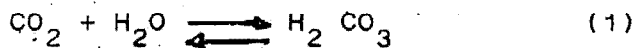
En las aguas capturadas por el hoyo se destaca un elevado contenido de CO_2 . El pH en ese sitio es bastante bajo a pesar de poseer una alta dureza. El contenido de iones SO_4^{2-} es también relativamente alto, mientras que la temperatura es del orden de las que se observan en las cavidades. El RSC en este caso, está en los alrededores de la saturación.

En el sentido vertical B→ E→ F se aprecia un incremento progresivo del CO_2 en las zonas de infiltración, saturación y saturación y circulación profunda, respectivamente, mientras que el pH que en las aguas de cueva es elevado, toma valores relativamente bajos (y del mismo orden) en ambos tipos de exsurgencia. Por otra parte, la dureza, el contenido de ion SO_4^{2-} y la temperatura se incrementan en el sentido vertical, (en el último caso, debido a la influencia del grado geotérmico).

Como puede apreciarse, entre el modelo de disolución vertical y horizontal sólo existe concordancia en el comportamiento de la variación de la dureza y el ion SO_4^{2-} . Sin embargo, el comportamiento observado en las aguas de cueva situados a diferentes niveles de cavernamiento (ver figura 9) sugiere que en el sentido vertical existe un mecanismo semejante al horizontal: incremento de especies básicas a expensas de un consumo de CO_2 .

Si asumimos que el aumento creciente de las especies carbonatadas en las aguas que se infiltran verticalmente a través de las fisuras de las calizas, es debido a la interacción de éstas con el medio carbonatado, para poder explicar que dichas aguas emergen desde zonas relativamente profunda, con un contenido de CO_2 elevado después de haber disuelto un gran volumen de roca, es necesario admitir, que en un inicio, debían haber tenido una concentración de CO_2 aún mucho mayor. Luego es necesario suponer que, o bien en la cobertura de los mogotes y en los hoyos de montaña, las aguas deben haber alcanzado altos contenidos de CO_2 (lo cual concuerda con los altos valores obtenidos en E-9), o que además de este aporte, debe haber contribuido el procedente del suelo de los valles u otras fuentes, como es ilustrado en la figura 9.

Este aporte adicional de CO_2 , en un medio donde no se facilita la evaporación podría explicar los bajos valores de pH de las exsurgencias, como consecuencia de formación y disociación del ácido carbónico:



El valor de RSC, que en definitiva es dependiente del CO_2 y el pH 18, toma valores bajos como consecuencia de los valores de pH.

El arroyo de los Ñames, que evidentemente evacúa parte de las aguas de este sistema cársico, presenta valor de pCO_2 superior al de las cavidades e inferior al del hoyo; el pH es menor que el de las aguas de cueva y mayor que el del hoyo; la dureza, el SO_4^{2-} y la temperatura son superiores en dicho arroyo a los restantes puntos y el RSC es del mismo orden que el de las aguas autóctonas de la cueva de Pio Domingo.

En la figura 8 se ilustra el comportamiento de los sitios seleccionados en la Sierra de San Carlos y en los valles que se extienden hacia el SW en dirección de la Sierra de Guane (A5-sumidero, C-5 resurgencia del arroyo Cantera, E-12 manantial Los Acostas y F-4 "Baño Caliente").

El agua del arroyo, en su curso hipogeo sufre cambios más acentuados de los parámetros e índices químico-físicos, que los restantes arroyos transfluentes. Esto es debido a una mayor contribución del aporte autóctono, teniendo en cuenta que la trayectoria subterránea de este arroyo es superior. Un cuadro comparativo del comportamiento de los distintos cursos transfluentes, se aprecia en la Tabla 2.

Con relación a los puntos representativos de las exurgencias de la zona de saturación (E-12) y de saturación y circulación profunda (F-4), se observa en la Figura 8 que en el segundo caso, la concentración de CO_2 es ligeramente mayor. Son superiores también los valores de dureza, el contenido de ión SO_4^{2-} y la temperatura, mientras que el pH y el RSC son del mismo orden.

Modelo de consumo de CO_2 y de disolución química

Un resumen esquemático de la variación del contenido de CO_2 promedio, obtenido en los distintos tipos de aguas estudiadas se expone en la figura 9.

En el sentido horizontal A \rightarrow C \rightarrow D, se observa como resultado del proceso de disolución cársico un consumo creciente de CO_2 . Esto da lugar a un incremento de las especies alcalinas, lo que se refleja en el correspondiente aumento del pH y la dureza y finalmente, las aguas que en un inicio estaban insaturadas, se hacen cada vez más saturadas y sobresaturadas.

En las cavidades, donde predomina un régimen de evaporación, el contenido de CO_2 es bajo y el pH es elevado. Como consecuencia de esto las aguas están generalmente sobresaturadas.

Efecto del clima en el proceso de carsificación

La influencia del clima en la intensidad de la disolución cársica ha sido objeto de polémicas en la literatura. En las regiones tropicales, las épocas en que existen los mayores volúmenes hídricos (debido a las precipitaciones) coinciden con los períodos más calientes y húmedos, a diferencia de los países de clima templado con nieve. Algunos autores 31 han planteado que en los países tropicales la carsificación no debe ser muy intensa, pues las altas temperaturas existentes no favorecen la disolución del CO_2 . Sin embargo esta hipótesis no es consecuente con la cantidad y volumen de las cavernas observadas en algunos países del trópico ni con algunas morfologías, como las de los mogotes 32, que sugieren una intensidad del proceso de erosión cársica. Esto ha sugerido considerar como un factor de peso en la generación de CO_2 , la actividad biológica, que se favorece en los períodos húmedos y caliente.

En la figura 10 se ilustra uno de los resultados de las mediciones (en el arroyo Calientes), en el período 1978-1980. Como puede observarse, mientras la dureza es superior en los meses secos, el caudal es menor debido a las pocas precipitaciones. En los meses de lluvia, por el contrario la dureza es inferior y el caudal químico es superior. Debido a que la magnitud de este último parámetro (que es una medida de la cantidad de gramos por segundo que es disuelta por las aguas) es más elevada en el verano la intensidad de disolución resulta superior precisamente en esos meses lluviosos y menor en los meses secos.

Intensidad de la denudación cársica

Tomando como base los valores de dureza y caudal en distintos sitios del área estudiada, se calculó el caudal químico. Estos resultados se muestran en la figura 11. Los datos fueron tomados en el curso de dos días, durante la campaña de muestreo de agosto de 1979.

Como puede apreciarse, existe un incremento de dureza y caudal químico a lo largo de la cuenca. En los puntos extremos del diagrama (correspondientes a la Estación de aforo Portales II y al río Portales), se calculó una eliminación de 16063 y 208 gramos por segundo de CaCO_3 respectivamente, lo que hace un total de 16.27 kg/seg en la confluencia de ambos ríos. Teniendo en cuenta el valor de la densidad de la caliza, se encuentra que de existir durante todo el año el mismo régimen de flujo y una similar composición de las aguas, se disolvería anualmente en la cuenca, hasta el punto señalado, un equivalente de 10525 m³ de roca. Esto representa un volumen aproximado de 60 m por cada lado. Claro está, que tanto el caudal como la dureza varían en cada momento y para tener una cifra más representativa de la intensidad de la denudación cársica en esta región se requieren mediciones más sistemáticas.

BIBLIOGRAFIA

1. Garrels R.M., Christ. C.L. "Solutions, minerals and equilibria". Harper and Row, New York, 450 p, 1965.
2. Bakalowicz, M. "Geochimie des eaux kárstiques et Karstification Ann. Speleol. 30 (4), 581-585 (1975).
Baklowicz, M. Contribution de la Geochimie des eaux a la connoissance de l'aquifere karstique et de la Karstification. These C.N.R.S. Univ. Pierre et Marie Curie, Paris 269 p (1979).
3. Roques H. Sur la repartition du CO_2 dans les karsts. Ann. Speleol. 18 (2) 141-185 (1963).
4. Roques H., EK C. Etude experimentale de la dissolutions des calcaires per une eaux. Chargée de CO_2 . Ann Speleol. 28 (4) 549-563 (1971).
5. Boegli A. La corrosione per miscela d'acque. Alf. del Seminario di La Grotte d'Italia. 4 (4) 333-359 (1975).
6. Pickett R.G. A Study of calcite solutions at 10°C . Trans Cave Reaserch. Group ot Great Britain. 7 (4) 41-52 (1964).
7. Manguin, A. Contribution a l'etude hydrodinamique des aquiferes Karstiques. These. Univ. de Dyon. 1975.
8. Thrailkill T. Chemical and hydrologic factors in the excavation ot limestone caves. Geolog. Soc. Am. Publ. 79 (1) 19-45 (1968).
9. Shuster E., White E. Source areas and climate effects in carbonate groundwaters determined by saturation indices and carbon dioxide pressures. Water Res. Research. 8 (4) 1067-1073 (1972).
10. Miserez J.J. Premier belan des indices de saturation en carbonates dans le bassin supereur de l'Areuse (N.E.) Extrait des Actes du 4^o Congress suisse de Speleologie Nauchatiel 1970. 104-120 (1971).

11. Langmuir D. The geochemistry of some carbonate groundwaters in Central Pennsylvania. *Geochim Cosmochim. Acta* 35 (10) 1023-1045 (1971)
12. Fincham A, Ashton K. The University of Luds Hydrological Survey Expedition to Jamaica, 1963. *Trans. Cave Res. of Great Britain*, 9 (1) 1-60 (1967).
13. Brown M. Ford D. Caves and Groundwaters Patterns in tropical Karst Environment, Jamaica, West Indies. *Am. J. Sci.* 273, 622-633 (1973).
14. Back W. Hanshaw B.B. Comparison of chemical hydrogeology of carbonate peninsules of Florida and Yucatan *J. Hydrol.* 10 - 330-368 (1970).
15. Harmon R.S. Preliminary results on the groundwaters geochemistry of the Sierra del Abra region North-Central Mexico. *Nat. Spel. Coc. Bull. USA* 33 (2/73-85) (1971).
16. Gascoyne M. Hydrogeology and Solution Chemistry of North. Venezuelan Karst. *Bol. Soc. Venezolana. Espel.* 9 (17) 5-20 (1978).
17. Fagundo J.R., Valdés J. Estudio químico-físico del comportamiento de las aguas cársticas de la región de San Antonio de los Baños (La Habana, Cuba) mediante el uso de modelos matemáticos. *Ann. Speleol* 30 (4) 643-653 (1975).
18. Valdés J., Fagundo J.R. Determinación de la capacidad de disolución de las aguas cársticas durante un año hidrológico. *Ingeniería Hidráulica* 1 (2) 61-77 (1980).
19. Fagundo J.R., Valdés J. Pajón J., Rodríguez J. Comportamiento químico-físico de las aguas cársticas en la cuenca del río Cuyaguaje. *Ingeniería Hidráulica* 11 (3) 261-274 (1981).
20. Faungo J.R., Valdés J., Pajón J. Estudio del Proceso de disolución cárstica en la cuenca del río Cuyaguaje *Voluntad Hidráulica*. En imprenta.

21. Valdés J., Cruz de la, A. Caracterización geomatemática de las aguas de la cuenca del río Cuyaguaje (en esta edición) (1982 a).
22. Acevedo M. Geomorfología de Sumidero y sus inmediaciones, Sierra de los Organos, Pinar del Río, Cuba, Revista Tecnológica No. 3-4, 33-54 (1971).
23. Acevedo M., Gutiérrez R. El Sistema Cavernario Majaguas. Cantera, Pinar del Río, Cuba. Bol. Soc. Venezolana Espel. 5 (10) 125-142 (1974).
24. Jiménez N. Clasificación Genética de las Cuevas de Cuba. Acad. Cienc. Cuba, La Habana. 224 pp.
25. Pszcolkowski A. Geosynclinal sequences of the Cordillera de Guaniguanico in western Cuba; their lithostratigraphy, facies development and paleogeography. Acta Geologica Polonica. 28 (1) 1-96 (1978).
26. Acevedo M., Gutiérrez R. Contribución al estudio de la estratigrafía del Cuaternario del Occidente de Cuba. Voluntad Hidráulica 11 (29) 59-62 (1974).
27. Piotrowska K. Nappe Structure in the Sierra de los Organos Western Cuba. Acta Geológica Polonica 28 (1), 97-170 (1978).
28. Díaz Cisneros, L.R. Monografía hidrogeológica de la cuenca del río Cuyaguaje. Trabajo en preparación.
29. Lapshin N. Iturralde M. Oscotski A. División en regiones hidrogeológicas de la zona Guane-Mantua, Provincia de Pinar del Río. Hidrogeología y Estratigrafía No. 5, 37-54 (1968).
30. Markowicz M., Pulina M. Ilósciowa Pólmikroanaliza Chemicznawod W. Obszarach krasu Weglanowegu Univ. Slaski, Katowice 67 p (1979).
31. Corbel J. Erosion en terrains calcaires. Annales Géogr 68, 97-120 (1959).
32. Lehman H. Revista Geográfica La Habana, 30 (2) 45-53 (1960).

TABLA 1

Valores medios de parámetros e índices químico-físicos en 35 aguas naturales muestreadas durante las estaciones lluviosas y secas del período 1978-80, clasificadas según sus características hidrogeológicas (se incluyen aguas del tipo P muestreadas en verano de 1981).

| Tipo de agua | T | GVT | PCO ₂ | pH | D | HCO ₃ ⁻ | SO ₄ ⁻ | SPC | RSC | Ca ⁺⁺ /Mg ⁺⁺ |
|--------------|------|------|------------------|------|-----|-------------------------------|------------------------------|------|-------|------------------------------------|
| A | 24.1 | 13.2 | 6.03 | 6.91 | 35 | 56 | 5 | 104 | -1.91 | 3.9 |
| B | 20.9 | 4.6 | 1.12 | 8.10 | 111 | 153 | 3 | 254 | 0.16 | 2.3 |
| C | 23.4 | 7.2 | 5.37 | 7.33 | 116 | 143 | 5 | 250 | -0.67 | 4.9 |
| D | 25.3 | 7.5 | 3.98 | 7.65 | 168 | 186 | 35 | 375 | 0.07 | 4.5 |
| E | 23.3 | 4.4 | 10.23 | 7.28 | 179 | 208 | 12 | 352 | -0.24 | 10.0 |
| F | 26.5 | 1.7 | 11.75 | 7.33 | 266 | 257 | 74 | 538 | 0.22 | 3.9 |
| P | 26.8 | - | 20.67 | 7.30 | 266 | 203 | 28 | 1068 | -0.45 | 1.7 |

TABLA 2

Variación de los parámetros e índices químico-físicos e hidrogeológicos en ríos transfluentes, después de atravesar un macizo carbonatado

| Río subterráneo | ΔD | ΔT | ΔpH | ΔRSC | $\Delta - pCO_2$ | Δ Caudal | Espesor macizo (Km) |
|-----------------|------------|------------|-------------|--------------|------------------|-----------------|---------------------|
| Santo Tomás | 30 | 2 | 0.40 | 0.73 | 1.4 | - | 2.0 |
| Alcalde | 84 | 4 | 0.75 | 1.60 | 7.4 | 0 | 0.75 |
| Caliente | 7 | 2.4 | 0.49 | 0.89 | 5.9 | -5 | 0.4 |
| Candelero | 56 | -0.4 | 0.17 | 0.41 | 0.8 | 49 | 0.75 |
| Majaguas | 29 | 3.4 | 0.68 | 1.01 | 3.2 | 216 | 2.3 |
| Cantera | 120 | 5.9 | 0.99 | 2.26 | 9.7 | 106 | 5 |

ESQUEMA DE LA DISTRIBUCION DE LOS PUNTOS DE MUESTREO HIDROQUIMICO EN LA CUENCA DEL RIO CUYAGUATEJE.

The map illustrates the Cuyaguatzeje River Basin, showing the river's course from its headwaters in the north to its mouth in the south. Key features include:

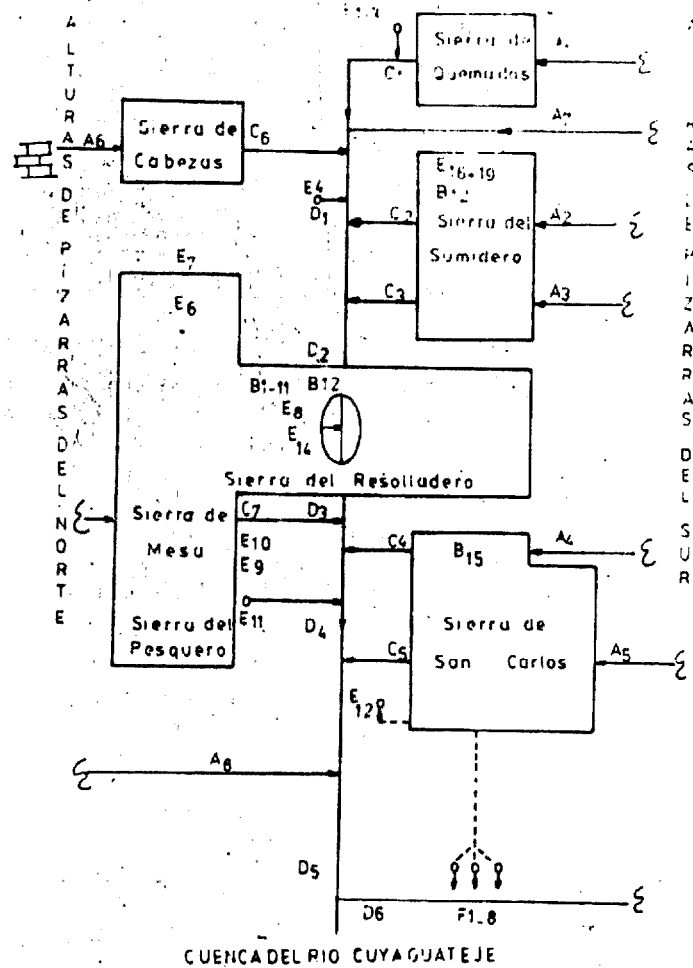
- Topography:** Shaded areas represent karstic terrain (MACIZOS KARSTICOS).
- Water Flow:** Solid lines indicate permanent surface currents (CORRIENTE SUPERFICIAL PERMANENTE), dashed lines indicate temporary surface currents (CORRIENTE SUPERFICIAL TEMPORAL), and dotted lines indicate abandoned channels (CAUCE ABANDONADO).
- Infrastructure:** A network of roads is shown, including the main road from Guane to the headwaters.
- Sampling Points:** Numerous points are marked along the river and its tributaries, labeled with numbers (e.g., 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100).
- Other Features:** A dam or weir (CERRA DE OBRA HIDROTECNICA) is shown near the mouth of the river. A small lake or reservoir (LAGUNAS Y PRESAS) is located near the headwaters.

LEYENDA

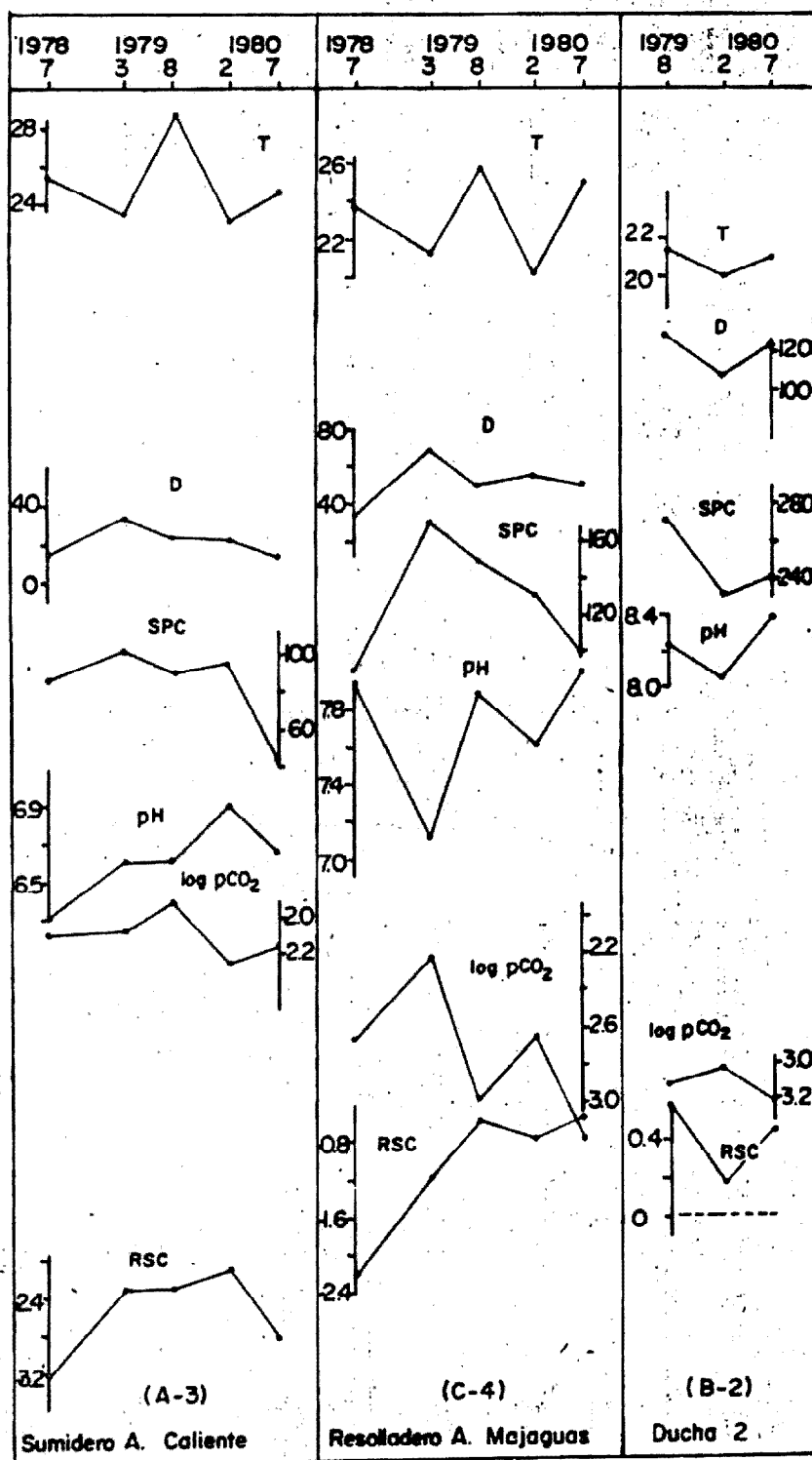
| | | | |
|--|----------------------------------|--|----------------------------|
| | MACIZOS KARSTICOS | | CONDUCTO SUBTERRANEO |
| | CORRIENTE SUPERFICIAL PERMANENTE | | LAGUNAS Y PRESAS |
| | CORRIENTE SUPERFICIAL TEMPORAL | | CERRA DE OBRA HIDROTECNICA |
| | CAUCE ABANDONADO | | PUNTO DE MUESTREO |

Escala 1:250,000

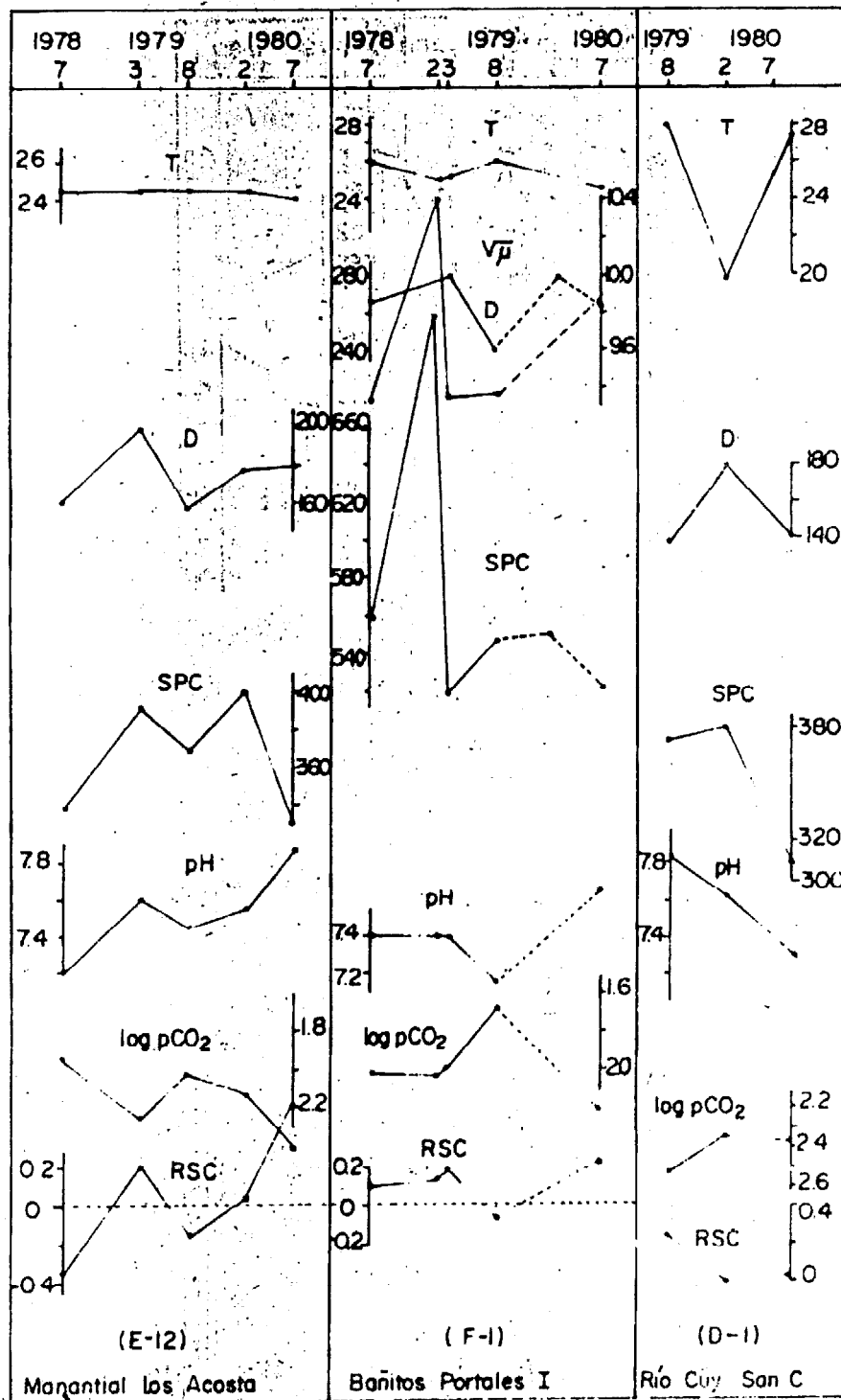
Figure 2



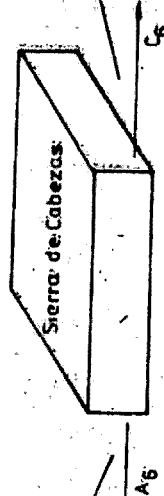
VARIACION ESTACIONAL DE PARAMETROS QUIMICO-FISICOS EN LA CUENCA DEL RIO CUYAGUATEJE (1978-1980)



VARIACION ESTACIONAL DE PARAMETROS QUIMICO-FISICOS EN LA CUENCA DEL RIO CUYAGUATEJE (1978-1980)



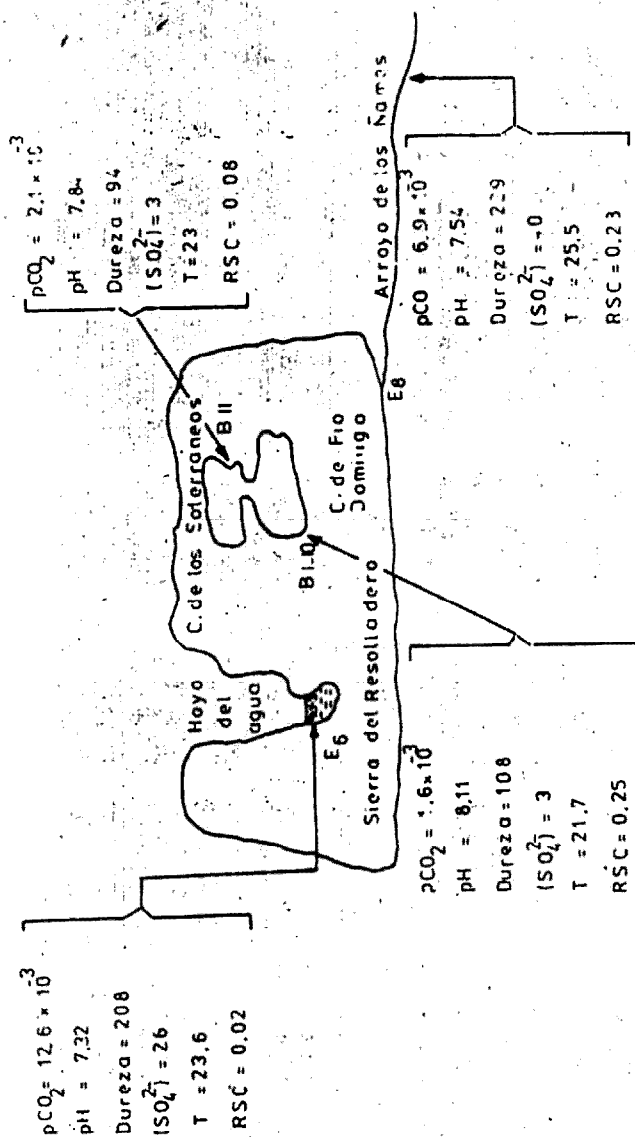
$pCO_2 = 4.7 \times 10^{-3}$
 $pH = 7.77$
 $D = 162$
 $SO_4^{2-} = 14$
 $T = 26.6$
 $RSC = 0.41$



$pCO_2 = 3.9 \times 10^{-3}$
 $pH = 7.94$
 $D = 218$
 $SO_4^{2-} = 8$
 $T = 27.2$
 $RSC = 0.02$

$pCO_2 = 28.7 \times 10^{-3}$
 $pH = 7.34$
 $D = 424$
 $SO_4^{2-} = 0$
 $T = 26.7$
 $RSC = 0.56$





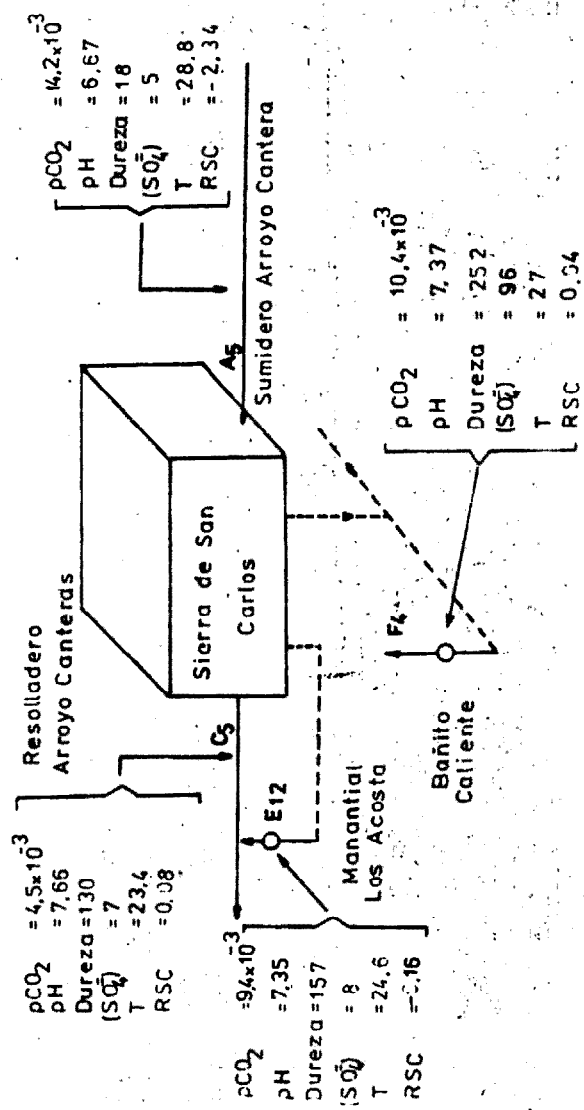
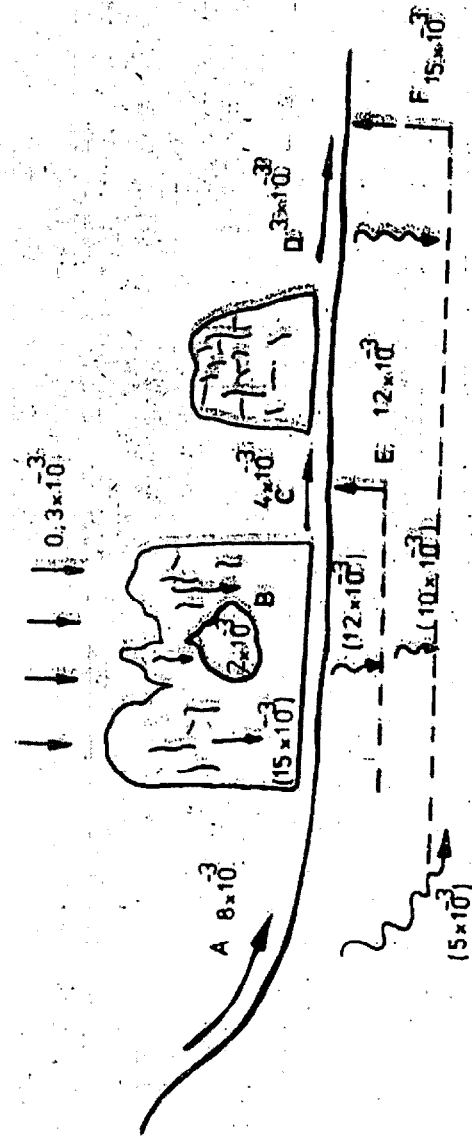
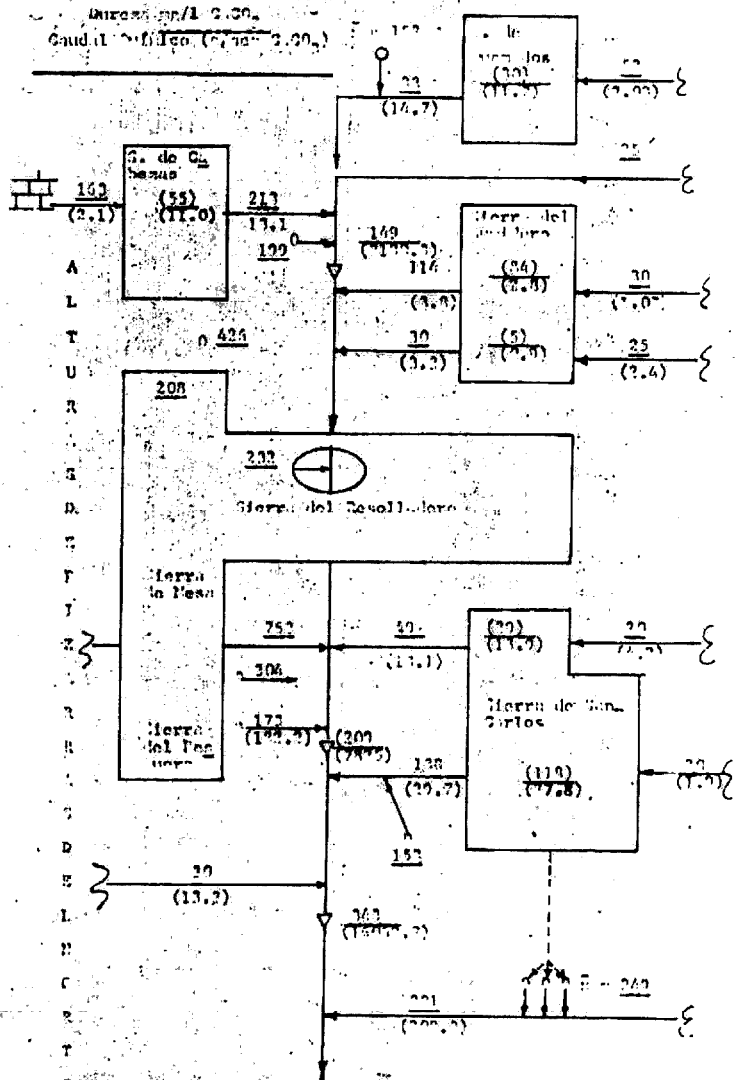
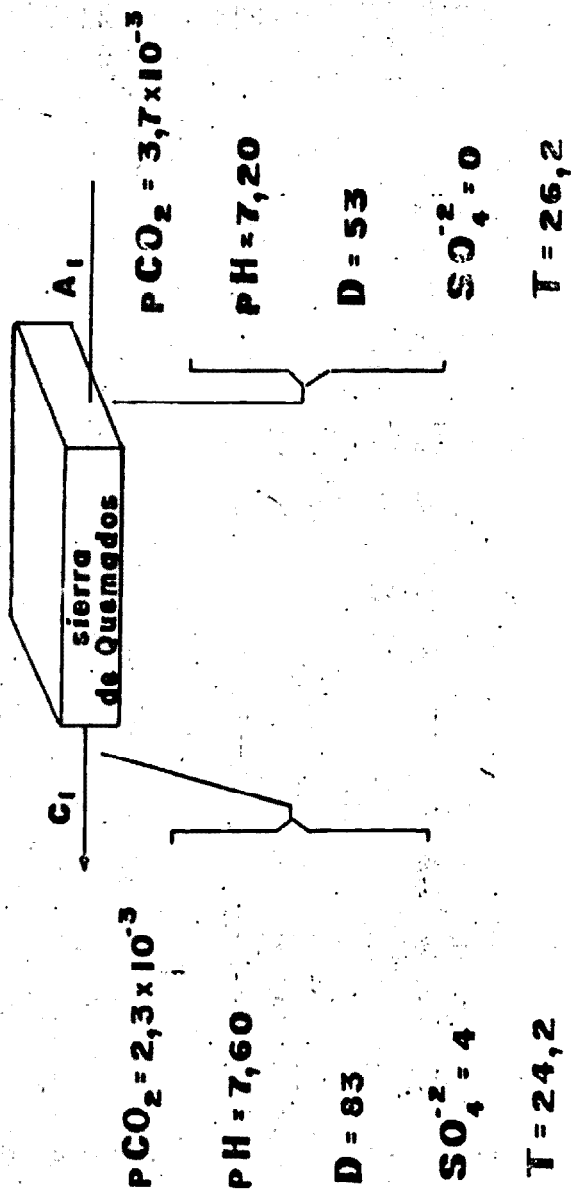


Fig. 5



Direct exp/1 2.00.
Gaud. 1 2.00. (2.00 2.00.)





RSC = -0,51

RSC = -1,24