

# Control automatizado de la calidad de las aguas y de sus variables químico-físicas

**Estrella Alvarez Varela, Juan.R. Fagundo Castillo e Iliana Vinardell Grandal.**

Centro Nacional de Investigaciones Científicas, Avenida 25 y 158, Cubanacán, Playa, Apartado Postal 6990, Ciudad de La Habana, Cuba.

Recibido: 22 de febrero de 1998. Aceptado: 17 de noviembre de 1998.

Palabras clave: hidrogeoquímica, calidad de las aguas, control.  
Key words: hydrogeochemical data, water quality control.

**RESUMEN.** Se presenta la generalización de un método de control de la calidad de las aguas basado en varios sistemas de programas que trabajan a partir de datos medidos *in situ*, así como la aplicación de estos sistemas al estudio de la evolución de la calidad de las aguas en diferentes medios. Los sistemas de programas SAMA y SAPHIQ han sido desarrollados sobre Windows en Borland Delphi y permiten realizar el procesamiento de datos hidroquímicos. Entre las posibilidades que brindan estos sistemas se encuentran el procesamiento y la validación de datos hidroquímicos, la clasificación y el control de la calidad de las aguas, la representación gráfica de los resultados correspondientes, así como el estudio en el tiempo de diferentes variables químico-físicas. La aplicación del sistema SAMA permitió encontrar relaciones empíricas entre la conductividad eléctrica y los principales macrocomponentes en aguas de diferente naturaleza geológica e hidrogeológica. Estas relaciones se determinaron a partir de un modelo de correlación matemática que pasa por el origen de coordenadas. Los coeficientes matemáticos dependen de la litología, el tipo de flujo y de las condiciones ambientales. Cuando en el modo de adquisición de la composición química de las aguas existe más de un factor predominante, estas presentan un conjunto de patrones hidrogeoquímicos y las ecuaciones de regresión entre la concentración iónica y la conductividad eléctrica son, para la mayor parte de los iones de segundo grado.

**ABSTRACT.** The water quality control method based on several computer systems, using the *in situ* measured data are presented as well as the application of these systems to study the water quality evolution in different places. The computer systems SAPHIQ and SAMA have been implemented in Borland Delphi Language. The computer systems have the possibility to process and validate the hydrochemical data, to classify and control the water quality, the graphical representation of the results and the study of the different parameters throughout the time. Empirical relations between electric conductivity and concentrations of the main water macrocomponents of different geologic and hydrogeologic nature were found. These relations were determined by means of polynomial correlational models which pass through the coordinate origin. The mathematical coefficients are dependent on the lithology, type of flow and environmental conditions. When more than one are the factors that with similar weight participate in the chemical composition acquisition mode, the water show several hydrogeochemical pattern and the regression equations of the correlations between ionic concentration and electric conductivity is of the second degree, at least for some of the ions.

## INTRODUCCION

El manejo y control de la calidad de las aguas es uno de los problemas asociados a la contaminación ambiental, que requiere de la utilización de métodos y técnicas de avanzada, que sean capaces de dar una respuesta rápida y eficaz sobre el estado de esos recursos en un momento dado, su posible empleo, su evolución al cabo del tiempo y que permitan tomar medidas para preservar su calidad y evitar su posible deterioro.

Los métodos matemáticos y estadístico-matemáticos, en particular, dan la posibilidad de expresar en forma compacta el objeto en relación con sus atributos. Los métodos de la Estadística Clásica o Descriptiva han sido los más empleados por los investigadores, tanto en el campo de las geociencias como en otras ciencias. Su uso ha sido especialmente adecuado en el tratamiento de las grandes bases de datos originadas en los programas de control de la calidad del agua.<sup>1</sup>

En muchos países existen redes de control de la calidad de las aguas, tanto superficiales como subterráneas, las cuales generan un gran volumen de datos hidroquímicos, hidrológicos y climáticos, cuyo procesamiento estadístico puede brindar una valiosa información acerca de las regularidades matemáticas entre las diferentes variables.<sup>2</sup>

Con el objetivo de conocer la calidad de los recursos hídricos y los cambios que experimentan como resultado de la actividad del hombre, muchos países, entre ellos Cuba,

cuentan con redes de estaciones de control donde, de manera continua, se registran las condiciones hidrometeorológicas y en forma sistemática, se realizan análisis químico-físicos y bacteriológicos de las aguas. Esta actividad genera un volumen de información cuyo procesamiento y uso adecuado es de valiosa importancia para la mejor administración y explotación de los recursos hidráulicos.<sup>3</sup>

En los últimos años, se ha desarrollado un conjunto de métodos analíticos y equipos electrónicos novedosos con vistas al control de las aguas naturales en lugares de interés económico tales como ríos superficiales, embalses, pozos y otras fuentes donde se controla la calidad química y bacteriológica de las aguas, así como su salinidad, su mineralización y otros indicadores.

Con el control de la calidad de las aguas se asocia también, la elaboración y explotación de sistemas de programas específicos con el objetivo de crear ficheros de datos, hacer su procesamiento estadístico, determinar la precisión de los análisis químicos, buscar tendencias y otros.<sup>4,5</sup>

El presente trabajo tuvo como objetivo presentar dos sistemas de computación para el procesamiento de datos hidroquímicos y el control de la calidad de las aguas, describir sus posibilidades y de esta forma, demostrar que constituyen herramientas muy útiles y de muy fácil utilización por usuarios no especialistas en computación.

## MATERIALES Y METODOS

### Muestreo y análisis químico

Los datos que se procesan con estos sistemas proceden de cuencas experimentales estudiadas por el Instituto de Geografía y el Centro Nacional de Investigaciones Científicas y de redes de observación de la calidad de las aguas [Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH)]. Los análisis químicos de las aguas muestreadas en las cuencas experimentales (macrocomponentes) se realizaron en el campo, utilizando las técnicas de Markowicz y Pulina<sup>6</sup> y Krawzyk.<sup>7</sup> Se determinó además, *in situ*, la temperatura, el pH y la conductividad eléctrica (CE). Estas variables se midieron en diferentes puntos de muestreo, con una periodicidad diaria o mensual.

Las muestras correspondientes a la red de estaciones del INRH fueron analizadas en el laboratorio mediante técnicas descritas<sup>8</sup> dentro de las 24 h posteriores a la toma de la muestra.

### Procesamiento de datos hidroquímicos

Los datos hidroquímicos fueron procesados mediante los sistemas de programas elaborados con el objetivo de realizar la caracterización hidrogeoquímica de las aguas y el control de su calidad (SAMA y SAPHIQ).<sup>9,10</sup>

Como lenguaje de programación se empleó el Borland Delphi para Windows con ficheros de datos similares o transformables entre sí a través de los propios sistemas.

La información se puede introducir a partir de ficheros con una estructura definida, que contienen informaciones generales de la muestra, así como los valores de los macrocomponentes y algunas otras variables que se detallarán posteriormente y también, a través del teclado, teniendo la posibilidad de crear ficheros con esta información.

Los sistemas referidos han sido concebidos como módulos independientes. Están estructurados en forma de menú de opciones de varios niveles. En cada módulo se realiza un procesamiento gráfico de la información. Se incluyen chequeos de errores en las opciones que así lo requieren.

Para hallar el mejor ajuste de las curvas que relacionan la concentración de cada ión con la CE, ha sido utilizado un polinomio de 1ro hasta 5to grado que pasa por el origen de coordenadas. En este proceso se empleó el método de regularización con restricciones.

### Descripción de los sistemas de programas

El Sistema Automatizado para el Procesamiento de datos hidroquímicos (SAPHIQ)<sup>9</sup> tiene como objetivo procesar datos hidroquímicos con vistas a encontrar propiedades químico-físicas de las aguas que permitan su caracterización espacial desde el punto de vista hidroquímico; obtener relaciones o índices geoquímicos que faciliten la interpretación de los procesos de interacción de las aguas con el medio físico-geográfico y geológico por donde se mueven; obtener información de carácter hidrológico e hidrogeológico y por último, evaluar la variación temporal de diferentes variables, lo que brinda información, en forma indirecta, de las características del drenaje en la cuenca.

A partir de las principales variables químico-físicas, expresa las concentraciones iónicas (Ci) en diferentes unidades (meq/L, mg/L,

% meq/L), calcula la dureza, la mineralización en diferentes expresiones y los principales estadígrafos de los datos. También determina la conductividad eléctrica teórica según los modelos de Dudley y Miller; relaciones iónicas de interés geoquímico; así como los índices de agresividad de las aguas sobre la base de los modelos de Tillman-Trombe ( $\Delta pH$ , pH de saturación y  $CO_2$  en equilibrio) y de Back y col. (fuerza iónica, relación de saturación de la calcita (RSC), relación de saturación de la dolomita (RSD), relación de saturación del yeso (RSY) y  $CO_2$  en equilibrio). Permite además, la representación gráfica de variables tales como: temperatura, pH,  $CO_2$ , conductividad eléctrica, mineralización (TSS,  $\Sigma C$ ,  $\Sigma_m$ ),  $CaCO_3$ , RSC, RSD y RSY en función del tiempo y de la dureza. También se representan el pH y la dureza en el diagrama de Tillman-Trombe modificado por Muxart. Las series cronológicas que se muestran en los gráficos, pueden ser utilizadas para evaluar tendencias y hacer pronósticos sobre la calidad de las aguas de los sitios estudiados.

Las posibilidades de este sistema están contenidas en su menú principal, cuyas opciones son las siguientes:

- ◆ Entrada de datos
  - Teclado
  - Fichero
- ◆ Cálculos numéricos
  - Concentraciones en mg/L
  - Concentraciones en % meq/L
  - Conductividad teórica
    - Modelo de Dudley
    - Modelo de Miller
    - Cálculo del factor exponencial
    - Cálculo de la conductividad teórica
  - Relaciones iónicas
  - Índices químico-físicos
- ◆ Gráficos
  - Gráficos en función del tiempo
  - Gráficos en función de la dureza
    - Diagrama de Tillman Trombe
    - Modelo de Back

### Descripción de cada una de las opciones

#### ◆ Entrada de datos

Permite introducir la información a partir de un fichero o a través del teclado. Chequea los errores de intervalo para cada una de las variables imprescindibles para el procesamiento.

#### ◆ Cálculos numéricos

**Concentraciones en mg/L.** Permite expresar los datos originales en mg/L y además calcular  $\text{Na}^+ + \text{K}^+$  (suma de las Ci), el TSS (total de sólidos solubles) y la dureza ( $\text{CaCO}_3$ ). Esta información la determina para cada muestra y la ofrece en forma de tabla.

**Concentraciones en %meq/L:** Esta opción permite realizar estudios geoquímicos. La información que brinda es útil para clasificar las aguas y constituye la base de algunos tipos de representaciones gráficas.

#### Conductividad teórica

**Modelo de Dudley.** Con este modelo se calcula la conductividad teórica y el porcentaje de error del análisis para cada muestra. La primera se calcula a 25 °C mediante la fórmula:

$$\log CE = \log \sum_{i=1}^n C_i S_i - 0,03 \log \sum_{i=1}^n C_i$$

donde:

$CE_T$ , CE teórica a 25 °C.

$S_i$ , Conductividad específica equivalente de cada ión i a dilución infinita y 25 °C.

$C_i$ , Concentración de cada ión i (meq/L).

**Modelo de Miller.** Utilizando este modelo la CE teórica tiene la expresión siguiente:

$$CE_T = a \sum_{i=1}^n (C_i S_i)$$

donde:

$CE_T$ , CE teórica a 25 °C.

$S_i$ , conductividad específica equivalente de cada ión i a dilución infinita y 25 °C.

$C_i$ , concentración de cada ión i (meq/L).

$f$ , factor de corrección que relaciona la CE real con la teórica, depende del tipo de agua y del grado de mineralización.

a fracción de iones que aparecen como iones complejos o pares iónicos.

Los datos con error mayor del 10 % indican la ocurrencia de deficiencias en los análisis químicos o en la medición de la CE y deben ser corregidos o eliminados.

#### Relaciones iónicas

Permiten definir las propiedades hidrogeológicas de un acuífero y determinar si está influido por elementos ajenos al medio geológico, calcular las relaciones entre cada ión y la suma total de las concentraciones iónicas, así como obtener distintos tipos de relaciones iónicas conocidas.

#### Indicadores químico-físicos

Posibilitan determinar las relaciones entre la concentración de cada ión y la CE, así como calcular además, las relaciones entre la suma de las concentraciones iónicas, el TSS y la dureza con la CE. Estas rela-

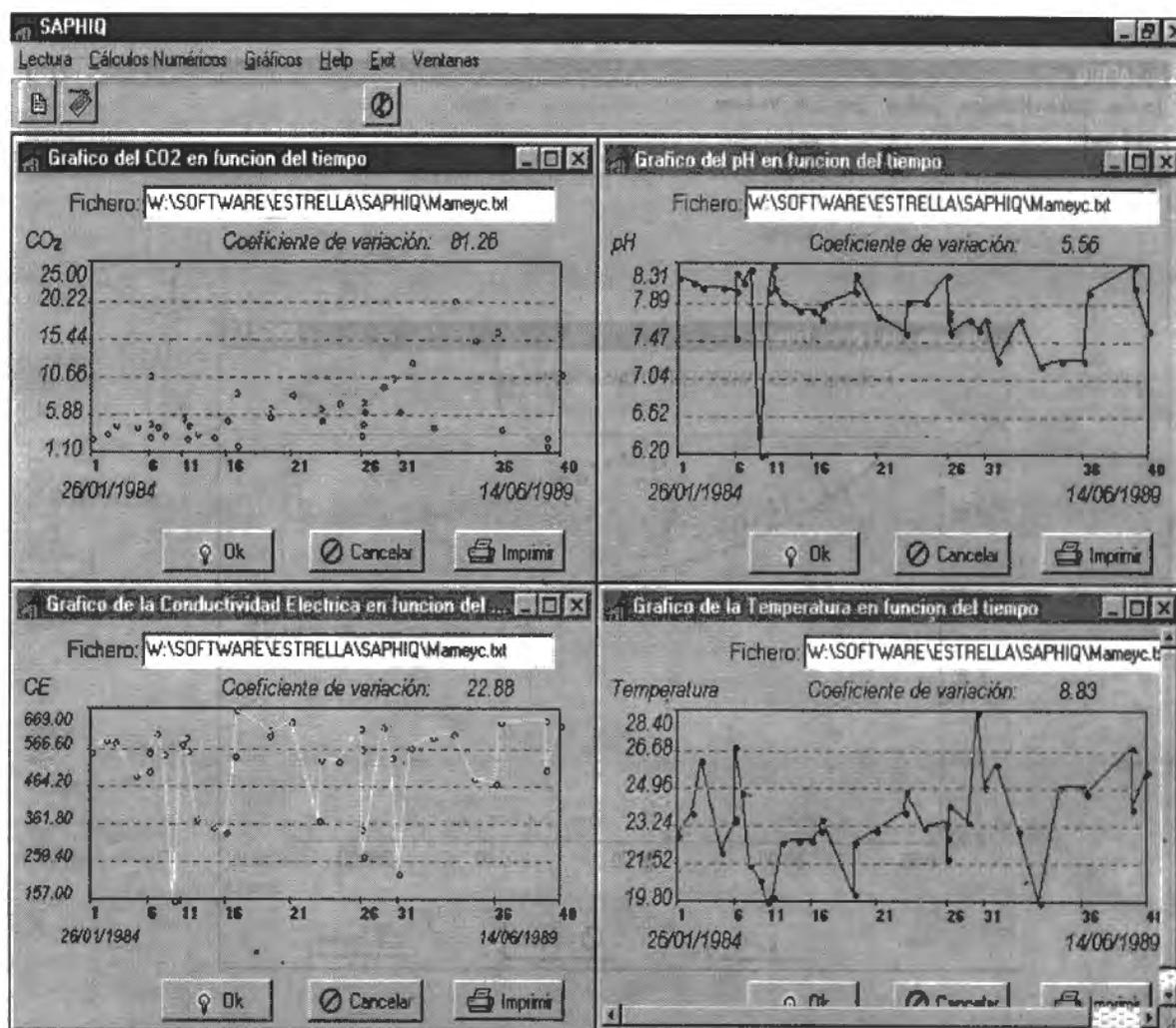


Fig. 1. Gráficos realizados con el sistema SAPHIQ de las variables temperatura, pH,  $\text{CO}_2$  y conductividad eléctrica en función del tiempo.

ciones pueden utilizarse para caracterizar acuíferos y evaluar la posibilidad de encontrar modelos de correlación para el control de la composición química y la mineralización de las aguas mediante mediciones de CE.

Además, mediante los modelos químico-físicos de Tillman-Trombe y de Back, permite calcular la raíz cuadrada de la fuerza iónica ( $\gamma$ ), el grado de saturación del agua respecto a los minerales calcita (RSC e ITT), dolomita (RSD) y yeso (RSY), así como la cantidad de  $\text{CO}_2$  disuelto y el pH de saturación. También posibilita calcular los  $p_k$  a la temperatura del agua, los coeficientes de actividad y las molalidades iónicas.

◆ **Gráficos**

**Gráficos en función del tiempo.** Permite obtener las funciones temporales de las variables siguientes:

Temperatura, pH,  $\text{CO}_2$ , conductividad eléctrica (Fig. 1).

Mineralización, dureza (expresada como  $\text{CaCO}_3$ ).

TSS (Total de sólidos disueltos) y RSC, RSD y RSY (relaciones de saturación de la calcita, la dolomita y el yeso respectivamente).

En todos los casos, se puede calcular el coeficiente de variación, el cual está definido por la fórmula:

$$c v = \frac{s}{x} * 100 \quad (\%)$$

donde:

s desviación estándar.

x media aritmética.

Esta magnitud permite conocer el grado de fluctuación estacional de la variable estudiada, lo cual está relacionado con la respuesta de las aguas a las variaciones del régimen de lluvias y en forma indirecta ofrece información sobre las características del drenaje en la cuenca en cuestión.

Con estos gráficos temporales, se puede hacer análisis de tendencia en forma cualitativa, lo cual permite hacer pronósticos sobre la evolución de la calidad de las aguas.

**Diagrama de Tillman Trombe.**

Permite apreciar el grado de saturación de un agua, a una temperatura dada, en función del pH y la dureza (Fig. 2).

El Sistema Automatizado para el Monitoreo de las aguas (SAMA), ayuda a obtener ecuaciones de dependencia matemática entre la concentración iónica y la conductividad eléctrica según un modelo de regresión matemática de 1ro a 5to grado que pasa por el origen de coordenadas. Las ecuaciones de mejor ajuste pueden ser obtenidas por tanteo o en forma automática sobre la base de la prueba de Fisher. Asimismo, posibilita calcular la composición química a partir de la CE. Los resultados reales pueden ser comparados con los obtenidos por correlación matemática mediante un índice de similitud y diagramas hidroquímicos de Stiff.<sup>10</sup>

La información de entrada puede ser introducida por el teclado de la computadora o a partir de un fichero texto previamente creado con la estructura siguiente:

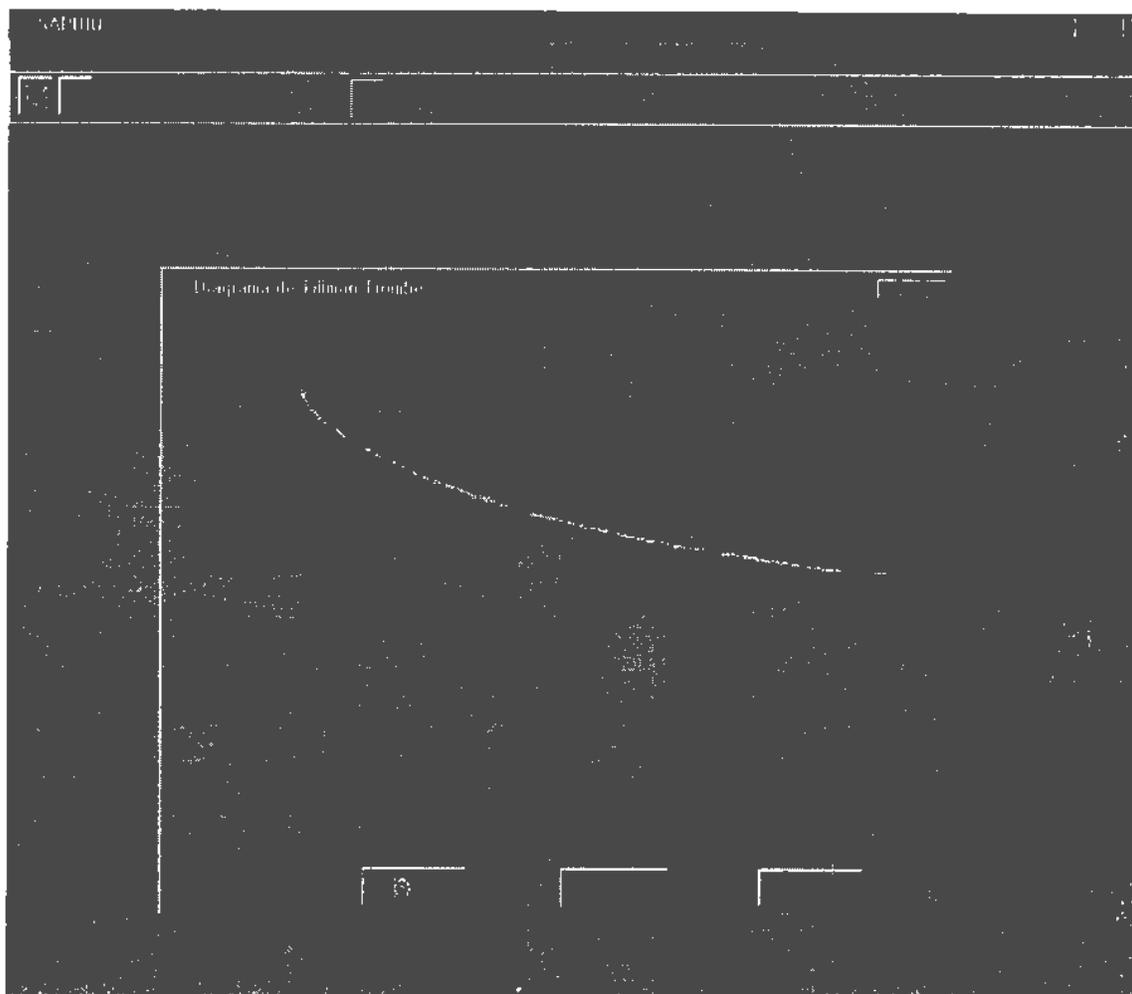


Fig. 2. Diagrama de Tillman Trombe en el que se aprecia el grado de agresividad de las aguas, realizado con el sistema SAPHIQ.

- Nombre de la muestra
- Fecha
- Hora
- Temperatura (°C)
- pH
- Conductividad eléctrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )
- $\text{CO}_2$  (mg/L)
- $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{Na}^+ + \text{K}^+$  (en meq/L)

El menú principal contiene las opciones siguientes:

**Lectura**

- Teclado
- Fichero

**Regresión polinómica**

- Por tanteo
- Automática

**Modelo polinómico**

*Leer Datos*

- Teclado
- Fichero

*Leer Modelo*

- Teclado
- Fichero

*Valores estimados*

*Diagramas de Stiff*

**Regresión polinómica**

El SAMA propone modelos matemáticos que están en concordancia con los físicos de adquisición de la composición química de las aguas: la línea recta que pasa por el origen de coordenadas, cuando un sólo factor es el dominante en este modo de adquisición, por ejemplo, la litología; la ecuación de segundo grado con intercepto cero, cuando más de un factor influye en el proceso de adquisición de la composición química de las aguas o tienen lugar mezclas de agua. También se pueden utilizar ecuaciones de 3ro a 5to grado en algunos casos especiales (Fig. 3).

Para el cálculo de la regresión se determinan las relaciones entre la  $C_i$  y la CE sobre la base de un polinomio desde 1ro hasta 5to grado que pasa por el origen de coordenadas:

$$y = b_0 + b_1x + b_2x^2 + b_3x^3 + b_4x^4 + b_5x^5$$

donde:

$x = \text{CE}$ ,  $y = C_i$ , donde  $C_i$  puede ser:  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ .

Una vez analizadas todas las variables, se crea un fichero con los coeficientes de las ecuaciones de mejor ajuste para cada ión, el cual se denomina fichero del modelo.

**Modelo polinómico.** Permite determinar las  $C_i$  y el total de sólidos solubles mediante mediciones de CE y el juego de ecuaciones calculado con el SAMA o en otro sistema estadístico.

Cuando sólo se da la CE como dato de entrada, se calculan las  $C_i$  utilizando los coeficientes del modelo matemático que se escoja y esta variable. En caso de que se disponga de los datos analíticos, el sistema compara los reales con los que se obtienen utilizando el modelo y la CE.

**Leer modelo**

**Teclado.** Esta opción permite leer los datos correspondientes a un modelo calculado en otro sistema estadístico. En caso de usar otro modelo de tipo estadístico, se deben tener en cuenta los criterios de rechazo de las muestras que resulten dudosas.

**Fichero.** Permite leer los datos del modelo a partir de un fichero (con extensión .MOD) creado con el propio sistema.

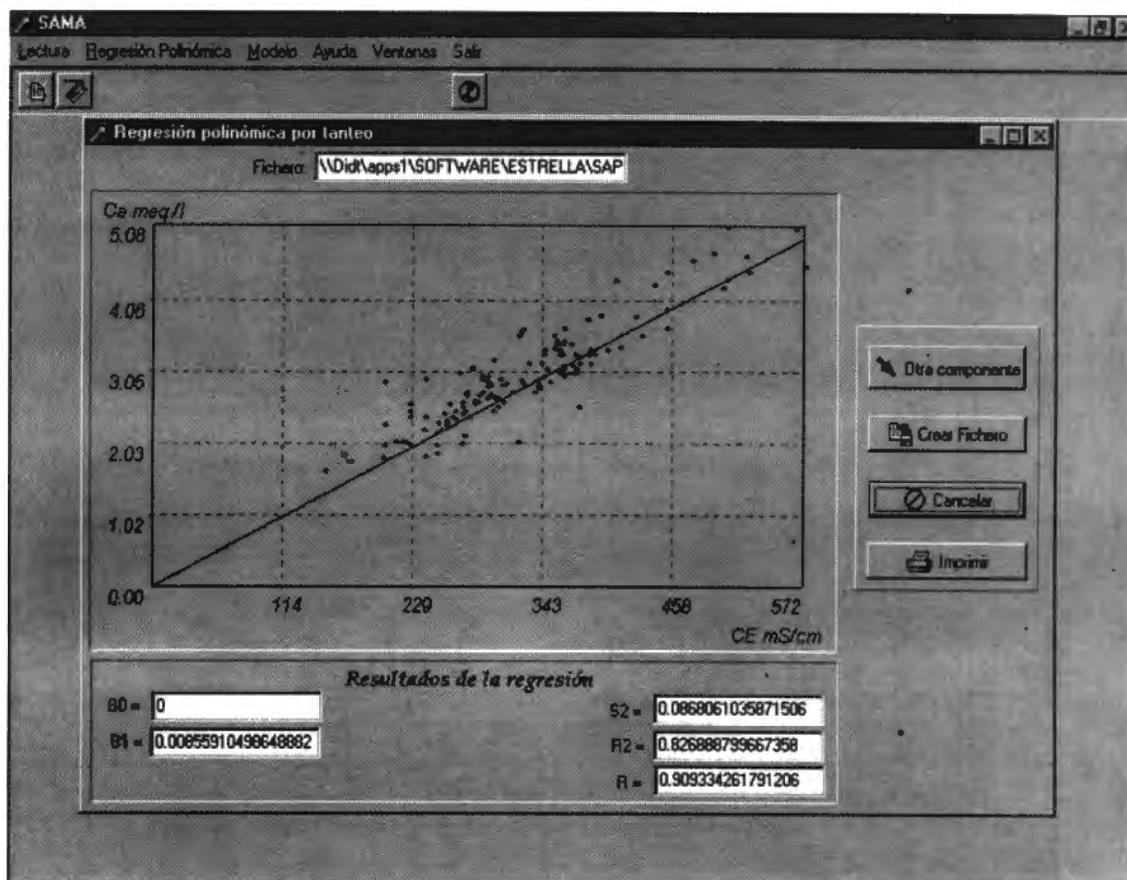


Fig. 3. Resultados de la regresión realizada con el sistema SAMA.

**Valores estimados**

Se calculan las  $C_i$  y el total de sólidos solubles utilizando las CE y el juego de ecuaciones del modelo. Si se dispone también de los datos reales, se calcula el índice de similitud entre ellos y los calculados con el modelo.

Este índice permite determinar cuantitativamente la semejanza entre los datos reales y los calculados por modelación matemática y se define por:

$$IS = \frac{\sum_{i=1}^n (R1 \cdot R2)}{2}$$

donde:

$$R1 = \frac{C_i \text{ Modelo}}{C_i \text{ Real}}$$

si  $C \text{ Modelo} < C \text{ Real}$  o

$$R1 = \frac{C_i \text{ Modelo}}{C_i \text{ Real}}$$

si  $C \text{ Modelo} > C \text{ Real}$  y

$$R2 = \frac{C_i \text{ Real}}{\sum +,- \text{ Real}}$$

donde:

$\sum +,- \text{ Real}$  suma de aniones o cationes.

La magnitud R1 es siempre una fracción de 1 y representa la relación entre el valor real y el teórico. La magnitud R2 revela el peso de cada ión en la composición química total de aniones o cationes.

**Diagramas de Stiff**

Esta opción permite representar gráficamente la composición química correspondiente a cada pareja de datos reales y calculados. (Fig. 4)

El sistema SAMA permite encontrar relaciones empíricas de tipo lineal o polinómicas, entre las  $C_i$  y la CE de las aguas, en estaciones de muestreo sistemático o acuíferos sujetos al control sanitario. Mediante las ecuaciones determinadas es posible controlar la composición química y la mineralización de dichas aguas mediante simples mediciones de CE.

**CONCLUSIONES**

Los sistemas **SAMA** y **SAPHIQ** ofrecen numerosas ventajas en la caracterización hidrogeoquímica de cuencas y redes de control de calidad. Permiten evaluar los diferentes tipos de aguas, su variación estacional en diferentes intervalos de tiempo y su grado de agresividad y saturación respecto a los minerales constituyentes de las rocas por donde escurren dichas aguas.

El sistema **SAPHIQ** permite hacer estudios hidrogeoquímicos, chequear la precisión de los datos, corregir valores defectuosos, obtener los estadígrafos más usuales de la estadística descriptiva. Permite hacer correlaciones gráficas en función del tiempo de muchas variables hidroquímicas, obteniéndose el coeficiente de variación de esas magnitudes, lo que permite interpretar el comportamiento de las aguas con relación a los efectos externos (régimen de lluvia, temperatura, etc.).

El **SAPHIQ** es un sistema que permite obtener propiedades químico-físicas de las aguas, así como la variación temporal de diferentes variables. El sistema permite además,

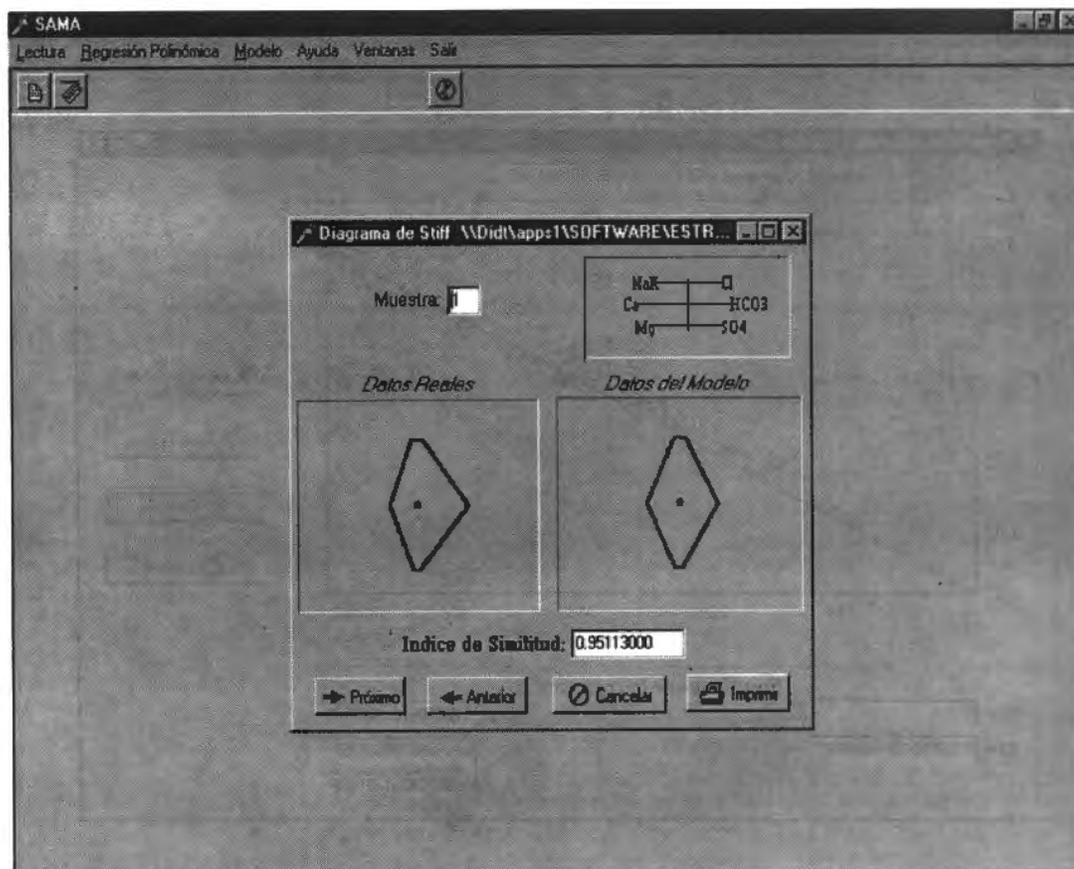


Fig. 4. Representación gráfica de los datos reales y los obtenidos por modelación mediante diagramas de Stiff, realizados con el SAMA.

realizar una caracterización de aguas naturales superficiales o subterráneas, alteradas o no por la acción del hombre o la intrusión salina.

Una vez caracterizadas hidroquímicamente estas cuencas o redes, el empleo del **SAMA** brinda la posibilidad de controlar la calidad de esas aguas con simples mediciones de conductividad eléctrica, utilizando para ello, relaciones de dependencia matemática entre esta magnitud y la concentración iónica.

Los sistemas descritos constituyen una herramienta muy útil para la caracterización, control automatizado de la calidad de las aguas naturales y minerales. Son novedosos y eficientes, se basan en sólidos principios químico-físico e hidrogeológicos. Los resultados del trabajo en que han sido aplicados han recibido una gran acogida en la comunidad científica nacional y extranjera, por su valiosa contribución en la solución de problemas de carácter práctico. Su introducción en el país ha sido generalizada por el Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos y ha comenzado a emplearse en el campo del Termalismo y la docencia y por especialistas de España y Francia.

Debido a sus características y su potencialidad, estos sistemas han sido incorporados a la Metodología hidrogeoquímica para la caracterización de las aguas cársicas del Insti-

tuto de Geografía de la Universidad de Bordeaux, Francia.<sup>11</sup>

#### BIBLIOGRAFIA

1. Guéron J., Fagundo J.R., Abelló I. y Ontivero E. Utilización de las técnicas de regresión en el procesamiento de difertente naturaleza hidrogeoquímica. En: Libro de Comunicaciones. I Taller sobre Cuencas Experimentales en el Karst, Matanzas, Cuba, 1992. Ed. Universidad Jaume I, Castellón, España, 195-204, 1993.
2. Machkova M., Tznkov K., Mandadjiev D., Velikovand B and Dimitrov D. Solving an ecological problem related to the surface and groundwater quality in the Upperthacian Lowland, Bulgaria. **Hidrogeología**, 8, 1, 1993.
3. Fagundo J.R., Ferrera V., Alvarez E., Vinardell I., Torres A. y Alvarez J. Control automatizado de la calidad de las aguas mediante patrones hidrogeoquímicos y mediciones de conductividad eléctrica en el ejemplo de la cuenca del Cauto. Memorias del II Congreso de AIDIS de Norteamerica y el Caribe y IV Congreso de la Asociación de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Santiago de Cuba, 1995. Tomo I, 106-114, 1995.
4. Hernández D., Ontivero E. y Fagundo J.R. Aplicación del análisis cluster al reconocimiento de patrones hidrogeoquímicos. Algoritmo para la obtención de grupos de acuerdo al índice de similitud. En: Contribuciones a la hidrogeología y medio ambiente en Cuba. Ed. J.R. Fagundo, D. Pérez Franco, A. Alvarez Nodarse, J.M. García e I. Morell, Universidad de Castellón, España, 155-166, 1996.
5. Ontivero E., J.R. Fagundo y Hernández D. DSIMULA: Sistema para agrupamientos basados en relaciones lineales. Aplicación al reconocimiento de patrones en un agua natural. En: Contribuciones a la hidrogeología y medio ambiente en Cuba. Ed. J.R. Fagundo, D. Pérez Franco, A. Alvarez Nodarse, J.M. García e I. Morell, Universidad de Castellón, España, 105-112, 1996.
6. Markowicz M. and Pulina M. Semi-quantitative chemical analyses of the waters in the carboniferous karst areas. Prace Naukowe. Univ. Slaskiego. No .289. Katowice, 1979.
7. Krawczyk W. Methods of field analytics of karst water. Hydrochemical methods in dynamic geomorphology. Scientific Works of Silesian University in Katowice, Katowice, (1254), 65-83, 1992.
8. APHA, AWWA, WPCF Métodos normalizados para el análisis de aguas potalbes y residuales. Versión en español. Tomada de la 17a edición de 1989. Ed. Díaz de Santos S.A., España, 1992.
9. Alvarez E. y Fagundo J.R. SAPHIQ, un sistema para el procesamiento automatizado de datos hidroquímicos. **Revista CENIC Ciencias Químicas**, 22, 59, 1991.
10. Alvarez E., Vinardell I., Fagundo J.R., Vega J. y Reguera E. Sistema automatizado de tratamiento de datos hidroquímicos para el chequeo de la calidad de las aguas. **Estudios Geológicos**, (Madrid), 45, 409, 1990.
11. Hoffmann F et Pellegrin J.C. Travaux du Laboratoire de Geographic Physique Appliquee-Bordeaux, No. 14, 13-79, 1996.