

# CONTRIBUCION DE LA HIDROQUIMICA AL CONOCIMIENTO DE LAS CARACTERISTICAS HIDROGEOLOGICAS Y DE KARSTIFICACION DEL MACIZO DE ARAMOTZ (BIZKAIA)

Por Iñaki Antigüedad Auzmendi (\*)

## RESUMEN

Se estudia el comportamiento hidrogeológico del macizo kárstico de Aramotz a partir de los análisis químicos efectuados, a paso de tiempo mensual, a lo largo del año 1984 en nueve de sus surgencias. Se toma en consideración la variabilidad en los contenidos relativos a cloro, bicarbonatos, conductividad y mineralización total, para poner de manifiesto la existencia de un acuífero epikárstico de desigual importancia a lo largo del macizo, que influye notablemente en la evolución química posterior de las aguas, ya que supone dos modalidades diferentes de infiltración, una más rápida y otra más retardada. De igual manera, se pone en evidencia la existencia de una zona saturada importante que ayuda a la homogenización hidroquímica observada a nivel de las surgencias.

## SOMMAIRE

On étudie le comportement hydrogéologique du massif karstique d'Aramotz à partir des analyses chimiques effectuées, pendant l'année 1984 à pas du temps mensuel, dans neuf exutoires du massif. On prend en compte pour l'étude la variabilité des contenus en les éléments suivants: chlore, bicarbonate, conductivité et minéralisation total. À la suite on met en évidence l'existence d'un aquifère epikarstique, de importance inégale tout au long du massif, lequel a une remarquable influence sur la postérieure évolution chimique des eaux parce qu'il suppose deux modalités différentes d'infiltration: l'une rapide et retardée l'autre. On met en évidence aussi l'existence d'une zone saturée importante que aide à l'homogénéisation hydrochimique observé au niveau des exutoires.

## LABURPENA

Ikerlan honetan Aramotz mazizo karstikoaren jokabide hidrogeologikoa aztertzen da hortarako 1984.urtean zehar bertako bederatzi sorburutan hileroko burututako analisi kimikoetatik baliatuz. Urotan disolbatutako zenbait elementuren aldaketak izan dira kontuan hartuak, hala nola kloroa, bikarbonatoak, mineralizazio osoa eta eroankortasuna bera ere. Ondorioz akuifero epikarstiko ezuniforme baten egotea susmatu da eta honek uren ondorengo bilakabide kimikoan duen eragin handia agerian utzi ere, zeren eta iragazketarako bide bi, arina edo geldia, ahalbidetzen baititu. Era berean alde saturatu garrantzitsu baten egotea ere azaldu da, sorburuetan den homogenizatze hidrokimikoaren kausa.

---

(\*) Geomorfologia-Geotektonika Departamentua. Zientzi Fakultatea. Euskal Herriko Unibertsitatea-Universidad del País Vasco. P.K. 644. BILBAO.

## INTRODUCCION

El karst, definido por Geze (1973) como «**région constituée par des roches carbonatées, compactes et solubles, dans lesquelles apparaissent des formes superficielles et souterraines caractéristiques**», es un medio que desde hace tiempo ha llamado la atención de los hidrogeólogos dado que el conjunto de procesos que en él pueden tener lugar (la karstificación, fundamentalmente) le confieren un importante interés como acuífero. Estudios intensivos realizados sobre diversos karsts, tanto en los Pirineos Centrales (Mangin, 1975) como en el Jura suizo (Tripet, 1972), han puesto de manifiesto la gran **heterogeneidad** de dicho medio, consecuencia del gran número de factores que intervienen en su desarrollo.

Los métodos actuales de investigación en terrenos kársticos tienden a considerar el karst como un **sistema** del cual se puede llegar a conocer con precisión la función de entrada (precipitaciones) y la función de salida (caudales), habiendo una relación entre ambas de causa a efecto, respectivamente (Figura 1). Es a partir del conocimiento de estas funciones y de su comparación que podemos deducir el **operador de transferencia** que tiene lugar dentro del sistema, es decir, el conjunto de procesos responsables de la modulación que experimenta la señal de entrada (hietograma) para convertirla en una señal de salida diferente (hidrograma).

J. Jacquet (1971) define así un sistema: «**toute structure, dispositif ou procédé réel ou abstrait qui relie, avec un pas de temps donné, une entrée, une cause ou une impulsion (de matière, d'énergie ou d'information) à une sortie, un effect ou une réponse (de matière, d'énergie ou d'information)**».

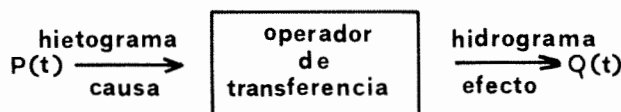


Figura 1.—El sistema acuifero. 1. Irudia.—Sistema akuiferoa.

En base a este concepto metodológico el karst es investigado de una **forma indirecta**, a partir del estudio e interpretación de sus efectos, considerados éstos como consecuencia directa del operador de transferencia, que tiene lugar en el sistema. Así, de esta manera, el diferente grado de karstificación existente en dos macizos carbonatados de Bizkaia fue puesto de manifiesto (Antigüedad et al., 1984) de una forma indirecta a partir del estudio de hidrogramas de crecida y estiaje relativos a la principal surgencia de cada uno de los macizos. Pero no solamente es el hidrograma el único **efecto** utilizable a tal fin, ya que, como se expresa en la definición de **sistema** dada más arriba, el **efecto** o la **respuesta** del sistema puede ser no sólo energético, sino también de materia y de información. Es desde este punto de vista que la **hidroquímica** (Miserez, 1973; Mangin, 1975; Bakalowicz, 1979; Müller, 1982), la **hidrotermia** (Andrieux, 1978) y la **hidrobiología** (R. Rouch, 1978) pueden también ser consideradas como **efectos**, y su interpretación es de gran ayuda en el conocimiento de las características hidrogeológicas y de karstificación del sistema acuifero.

Esta es la metodología empleada en el estudio del macizo kárstico de Aramotz, en nueve de cuyas surgencias se ha realizado un muestreo sistemático, con paso de tiempo mensual, a lo largo del año 1984. La interpretación de los análisis químicos realizados aportan una valiosa información para el mejor conocimiento del comportamiento hidrogeológico del sistema.

Este trabajo se enmarca dentro del Estudio Hidrogeológico de Bizkaia, que realiza el Departamento de Geomorfología y Geotectónica de la Universidad del País Vasco - Euskal Herriko Unibertsitatea con la financiación de la Diputación Foral del Señorío. A ésta mi agradecimiento por su autorización para publicar los presentes datos.

## EL MACIZO KARSTICO DE ARAMOTZ

El macizo de Aramotz corresponde a un abrupto relieve de materiales carbonatados que se extiende desde Lemoa-Amorebieta, en su parte noroccidental, hasta Mañaria, en su parte suroriental siguiendo la alineación estructural predominante en la cuenca (NW-SE) y cubriendo una superficie aproximada de 20 Km<sup>2</sup>. Este macizo supone la divisoria entre la cuenca del río Ibaizabal, por su parte septentrional y la del río Arratia, afluente de aquél, por su parte meridional. Morfológicamente dos partes están bien diferenciadas, correspondiendo, aproximadamente, a la mitad norte y a la mitad sur. En efecto, la primera de ellas se caracteriza por una cuenca endorreica, de forma alargada, delimitada por la línea de cumbres que la circundan (Urtemondo, 789 m.; Mugarra, 964 m.; Leungane, 1.009 m.) dándole un aspecto de plató elevado con una altitud media de 700-800 m. En esta zona las formas exokársticas abundan, depresiones fundamentalmente, consecuencia de una intensa fracturación (Figura 2). La vegetación es casi nula, estando reducida a pequeños grupos de hayas en las zonas deprimidas, lo que le confiere un aspecto de karst desnudo. En la mitad sur, sin embargo, la morfología es claramente diferente. Las depresiones casi desaparecen y el relieve, más o menos abrupto, se inclina hacia el sur. Se observan pequeños valles que hoy en día no llegan a ser funcionales ni en épocas lluviosas. Es digna de mención, en esta zona, la cubeta de descalcificación de Artaun, que cubre una superficie aproximada de 0,4 Km<sup>2</sup>, y donde se asienta el barrio del mismo nombre, único lugar habitado del macizo. En esta cubeta afloran materiales arcillosos que sirven de base como terreno de cultivo. En cuanto a la vegetación, sin llegar a ser masiva, sí es abundante, estando constituida, sobre todo, y además de los ya mencionados terrenos de cultivo de Artaun, por coníferas, que se asientan bien en esta zona. Los materiales carbonatados bajan aquí hasta los 200-250 m. en la parte occidental (proximidades de Igorre-Yurre) mientras que en la oriental (proximidades del barrio de Oba) se quedan en 600-700 m. En la parte más oriental del macizo (Mañaria) las calizas bajan hasta los 180 m., cota a la que son atravesadas por el río Mañaria, único lugar éste en que los materiales carbonatados están en relación con un río.

Litológicamente, el macizo de Aramotz está constituido por una potente formación carbonatada de origen arrecifal (calizas de Toucasia) perteneciente a lo que Rat (1959) denominó «complejo urgoniano» (Aptiense inferior - Albiense). Las calizas de esta formación son duras, consistentes y de colores claros. Se presentan bastante masivas y la estratificación sólo es observable en el borde norte del macizo, en donde los estratos buzan fuertemente hacia el noreste, metiéndose por debajo de los materiales funda-

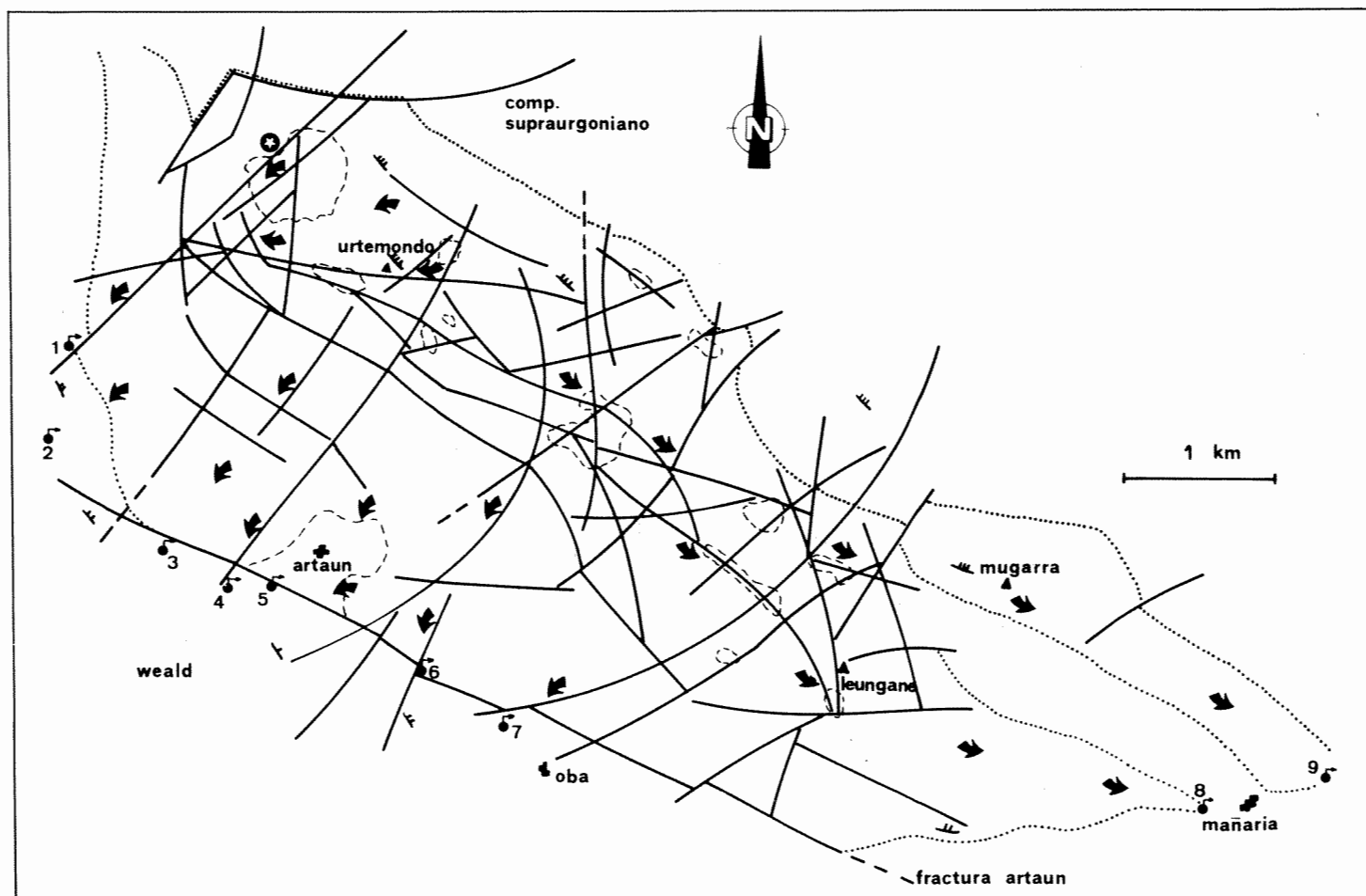


Figura 2.—Esquema del macizo de Aramotz: fracturación, surgencias consideradas.

2.irudia.—Aramotz mazizoko eskema: frakturaketa, aztertutako sorburuak.

- |             |                   |              |
|-------------|-------------------|--------------|
| 1. ORUE     | 4. ANDRAMARITURRI | 7. EMALDI    |
| 2. ITZA     | 5. BIKARREGI      | 8. ITURRIETA |
| 3. BITERIÑO | 6. UGARIO         | 9. HARROBIA  |

mentalmente detríticos del complejo supraurgoniano (Albiense superior - Cenomaniense inferior). En la terminación occidental (cerca de Lemoa) los materiales carbonatados pasan lateralmente a materiales margo-arcillosos, mientras que en el borde sur las calizas están cortadas por la fractura de Artaun (NW-SE) que las pone en contacto con los materiales arcilloso-detríticos del Weald (Neocomiense inferior - Aptiense). Hacia el este (sector de Mañaria) las calizas de Aramotz se desdoblan, prolongándose, por una parte, hacia el SE (cumbres de Untzilaiz, Aluitz, 1.032 m. y Anboto, 1.327 m.) y danto, por otra parte, el cierre anticlinal de Eskubaratz, fuera ya del macizo de Aramotz objeto de este estudio.

Estructuralmente las calizas parecen dibujar un suave sinclinal de eje NW-SE, que cubre la mayor parte del macizo, y que pasa, en su borde septentrional, a ser un anticlinal en cuyo flanco norte los estratos buzan fuertemente hacia el NE, introduciéndose debajo de los materiales detríticos del complejo supraurgoniano, como ya antes se ha comentado. En el borde sur, por el contrario, se encuentra la ya mencionada fractura de Artaun (NW-SE) que pone a

las calizas en contacto con los materiales wealdenses. La fracturación del macizo es bastante intensa, si bien se pueden diferenciar dos áreas de distinta intensidad de fracturación (Figura 2) que corresponden a las zonas morfológicamente diferenciadas anteriormente descritas. En efecto, en la mitad norte, allí donde las formas exokársticas son más frecuentes, la fracturación ha sido más intensa que en la mitad sur, lo cual influye notablemente, como luego veremos, en las modalidades de infiltración y, por consiguiente, en el quimismo de las aguas. En cualquier caso, las fracturas corresponden a dos direcciones fundamentales: la propia del macizo (NW-SE) y la perpendicular a ella (NE-SW).

Desde el punto de vista hidrogeológico hay que hacer notar que el drenaje fundamental del macizo se realiza por su borde este (sector de Mañaria), hacia el río del mismo nombre, a través, sobre todo, de las importantes surgencias de Iturrieta y Harrobia (números 8 y 9 de la Figura 2) captadas, en parte, para el abastecimiento de núcleos cercanos; no se descarta la posibilidad de una descarga directa al río. También es a tomar en consideración el dre-

naje realizado por el borde sur (situado a cota más baja que el borde norte), a lo largo del contacto mecánico (fractura de Artaun); en efecto, diversas surgencias se localizan en este borde, si bien corresponden a manantiales de escaso caudal (caudal medio inferior a 5 l/seg.). Es, sin embargo, a destacar la surgencia de Orue (número 1 de la Figura 2), situada en la zona occidental de este borde, allí donde la cota del contacto es más baja, captada para el abastecimiento, y que aporta un caudal medio de aproximadamente 90 l/seg., siendo sus variaciones de relativa poca amplitud, lo que le confiere un importante poder de autorregulación. El caudal de esta surgencia está siendo controlado desde septiembre de 1982 de forma continua mediante la instalación de limnógrafo. Diversos trabajos (Antigüedad et al., 1983; Antigüedad et al., 1984) han sido publicados a partir del estudio e interpretación de los hidrogramas correspondientes. Además de la ahora mencionada estación de aforos, existe también otra más, ésta en corriente superficial, que controla las aportaciones del río Mañaria una vez que éste ha atravesado las calizas del complejo urgoniano. El balance realizado en la cuenca vertiente de esta estación nos ha permitido cuantificar las aportaciones que, procedentes del macizo de Aramotz, son drenadas por el río Mañaria. Ambas estaciones de aforos forman parte de la red de control establecida en toda la provincia en el marco del Estudio Hidrogeológico de Bizkaia, al igual que el pluviógrafo recientemente instalado en la parte superior del macizo, con vistas a controlar de forma adecuada las entradas en el sistema.

**CARACTERÍSTICAS HIDROQUÍMICAS DEL MACIZO DE ARAMOTZ**

A lo largo del año 1984 se ha realizado en diferentes estados hidrodinámicos (crecidas, decrecidas y estiajes) un muestreo sistemático, con paso de tiempo mensual, en nueve surgencias del macizo, correspondiendo siete de ellas al borde sur (fractura de Artaun), y las dos restantes a la terminación oriental (sector de Mañaria) (Figura 2). Es de hacer notar que, durante el mes de agosto, no se realizó ninguna toma, por lo que el número de análisis efectuados en cada surgencia a lo largo del año ha sido de once (n = 11), excepto en la número 7 (Emeraldi), donde tampoco la hubo en enero (n = 10). En los análisis químicos se han determinado los contenidos en los cationes (Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Ca<sup>++</sup>, Mg<sup>++</sup>) y aniones (Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>-</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) mayoritarios, así como en sílice disuelta (SiO<sub>2</sub>) y otros parámetros característicos de las aguas (pH y conductividad), lo que hace un total de once variables por manantial. Para la elaboración del presente trabajo sólo se han considerado las variables conductividad, contenido en cloruros, contenido en bicarbonatos, y contenido total en elementos disueltos, las cuales nos van a permitir poner de manifiesto ciertas características del macizo de Aramotz, en lo que a modalidad de infiltración, importancia de la zona saturada y grado de karstificación se refiere.

Los resultados estadísticos obtenidos en cada una de las surgencias (función de salida) para las variables arriba consideradas se recogen en la Tabla 1, donde también figuran los resultados derivados del análisis de nueve muestras de aguas de lluvia (función de entrada) recogidas, a paso de tiempo mensual, desde marzo hasta diciembre de 1984, en los pluviógrafos de Aramotz y del Gorbea, este último controlado por el Grupo Espeleológico Vizcaíno.

A la vista de la Tabla 1 hay una cuestión a resaltar: **la**

**homogenización química de las aguas en las surgencias en relación con las aguas de lluvia**, lo cual se evidencia en una reducción muy importante de los valores del coeficiente de variación (V) para las variables consideradas. Es lo mismo para el resto de las variables analizadas, aunque no las tratemos aquí, de lo que da una idea la mineralización total. Esta homogenización **es consecuencia** de los procesos que tienen lugar en el seno del sistema acuífero en cuestión; es decir, no se trata de un simple tránsito de agua, sino de una **transferencia**, lo que supone la existencia en el sistema de mecanismos moduladores de la información de entrada (quimismo de las aguas de lluvia), mecanismos éstos tanto más intensos cuanto que la uniformidad en la información de salida (quimismo de las aguas en las surgencias) sea mayor, lo que viene reflejado por pequeños valores en el coeficiente de variación (V).

Pero, ¿cuáles son los mecanismos que pueden ejercer esa función de modulación? A partir de la esquematización del sistema kárstico dada por Mangin (1975) se puede decir que son dos los mecanismos fundamentales (Figura 3).

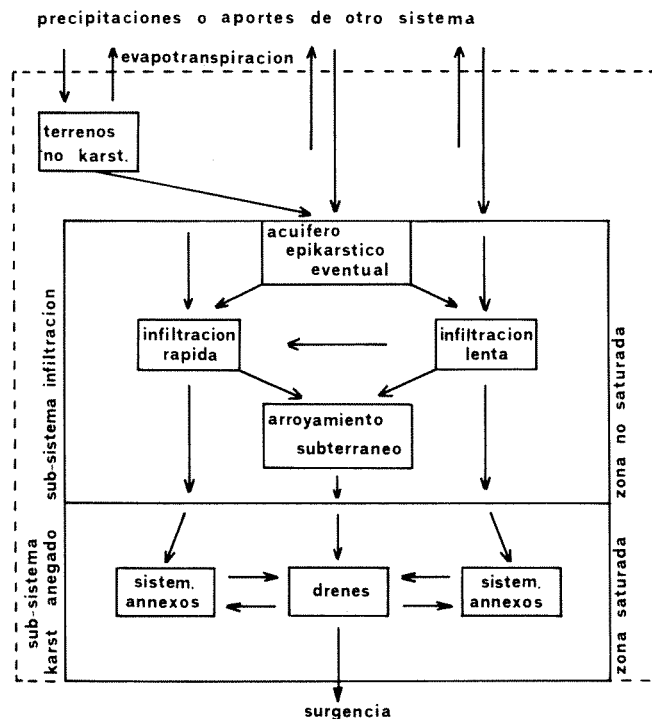


Figura 3.—Esquematización de un sistema kárstico (Mangin, 1975).  
3.irudia.—Sistema karstikoaren eskema orokorra (Mangin, 1975).

—**El acuífero epikárstico**: acuífero que eventualmente puede establecerse en la zona de alteración superficial de los macizos kársticos, allí donde la fracturación suele ser más intensa (Figura 4), permitiendo una acumulación más o menos importante de agua durante un tiempo también más o menos largo. Podríamos hablar, en este caso, de un acuífero «colgado» que puede tener sus propias salidas (surgencias). Cuando este acuífero superficial existe se puede hablar del sistema kárstico como un sistema acuífe-

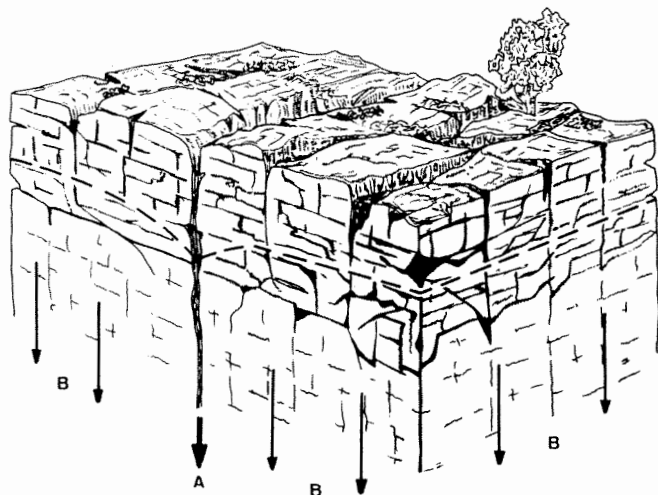


Figura 4.—Representación esquemática de un acuífero epikárstico (Mangin, 1975).

4.irudia.—Akuifero epikarstikoaren adierazpen eskematikoa (Mangin, 1975).

A — Infiltración rápida      A — Iragazketa arina  
B — Infiltración lenta      B — Iragazketa geldia

	Cl <sup>-</sup>			HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>			Cond.			Mineraliz.		
	m	s	v	m	s	v	m	s	v	m	s	v
Agua de lluvia (n=9)	4,82	2,98	61,83	15,07	12,14	80,58	53,33	15,58	29,22	*		
1.—ORUE n=11 n= 9	9,62 8,93	1,75 0,71	18,18 7,96	191,45	11,94	6,24	295,91	14,42	4,87	296	13,32	4,50
2.—ITZA n=11 n= 9	14,84 14,77	2,67 1,49	17,98 10,11	224,16	6,96	3,11	413,82	21,77	5,26	386	7,72	2,00
3.—BITERIÑO n=11 n=10	12,06 11,74	1,20 0,64	9,98 5,44	160,82	4,21	2,62	291,64	11,50	3,94	277	7,99	2,89
4.—ANDRAM. n=11 n= 9	11,52 11,10	1,16 0,80	10,08 7,17	221,42	7,65	3,46	386,09	23,66	6,13	356	13,07	3,67
5.—BIKAR n=11	11,77	1,08	9,22	268,05	15,65	5,84	515,27	32,98	6,40	504	35,82	7,11
6.—UGARIO n=11	9,48	0,63	6,69	211,36	6,76	3,20	340,09	16,76	4,93	336	14,14	4,21
7.—EMALDI n=10 n= 9	11,94 11,46	1,62 0,75	13,57 6,55	224,64	17,23	7,67	467,30	68,33	14,62	452	52,57	11,63
8.—ITURRIETA n=11 n= 9	8,83 8,02	2,06 0,56	23,36 7,00	145,22	6,81	4,69	250,73 240,00	26,38 10,94	10,52 4,56	245	15,98	6,52
9.—HARROBIA n=11 n= 9	8,81 8,43	1,02 0,67	11,54 7,94	162,72	7,71	4,74	253,09	8,18	3,23	255	11,08	4,34

Tabla 1.—Datos estadísticos para las aguas de lluvia y de nueve surgencias del macizo de Aramotz referidos a la conductividad (en micro-Siemens) y a los contenidos en cloruros, bicarbonatos y mineralización total (en mg/l.) a partir del muestreo sistemático mensual realizado en el año 1984.

$$m: \text{media aritmética } (m = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \cdot n_i}{N}) \quad S: \text{desviación típica} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - m)^2 \cdot n_i}{N}} \quad V: \text{coeficiente de variación} = \frac{S}{m} \cdot 100$$

En algunos casos se han hecho también los cálculos desestimando algunas observaciones (n<11) debidas a acontecimientos muy específicos que enmascaran las verdaderas variaciones debidas a un funcionamiento «normal» de los sistemas.

\* En las aguas de lluvia no consideramos válidas las medidas de mineralización y conductividad debidas a contaminación por el propio pluviógrafo.

ro multicapa. Según Mangin (op. cit.) el acuífero epikárstico constituye el reservorio principal de alimentación para la evapotranspiración y sirve también de medio tampón entre las precipitaciones y la infiltración. Es precisamente esta función tampón la que le da el carácter de modulador hidroquímico.

—**La zona saturada:** La posibilidad de acumulación de un volumen de agua importante en las proximidades de la surgencia conlleva a que la mezcla de las aguas procedentes de la infiltración con las aguas acumuladas en la zona saturada sirva a una mayor homogenización hidroquímica antes de que el flujo de agua circulante alcance la surgencia. Este mecanismo ha sido puesto de manifiesto por diversos autores, además de Mangin (op. cit.), tales como Miserez (1973) y Müller (1982). Este último afirma: «*L'atténuation de la fluctuation de ces valeurs par rapport à celles des précipitations est due à la présence d'un réservoir de grande dimension, qui modère les effets de dilution dus aux précipitations.*».

A la vista de lo afirmado por Müller (op. cit.) sería conveniente hacer una matización, en el sentido de que el reservorio no tiene por qué ser de grandes dimensiones, bastaría, para lograr una adecuada homogenización, el que el volumen de agua acumulada en la zona saturada fuese importante en relación con el volumen de agua procedente en cada momento de la infiltración. Este hecho puede tener especial significado en el macizo de Aramotz en donde parece existir una importante compartimentación de sistemas acuíferos, algunos de ellos de pequeña extensión, en los que la homogenización hidroquímica es un hecho, a pesar del escaso caudal medido en sus salidas.

Con objeto de poner de manifiesto la existencia de estos dos mecanismos en el caso concreto de Aramotz pasamos a continuación a interpretar las variaciones expresadas en la Tabla 1 para las variables consideradas.

### Cloruros

El contenido en cloruros en el agua de lluvia tiene un origen marino (evaporación en las masas de agua), como lo demuestra el hecho de que los contenidos en dicho elementos (es similar al sodio) disminuyan progresivamente a medida que nos alejamos de la costa. Así, mientras en las aguas de precipitación analizadas tanto en Aramotz como en el cercano macizo del Gorbea (ambas en el valle de Arratia) el cloro tiene un valor medio próximo a 5 mg/l. (ver Tabla 1); en el Pirineo central apenas si sobrepasa 1 mg/l. (Bakalowicz, 1979). Los contenidos medios en sodio son de 2 mg/l. y 0,4 mg/l., respectivamente. Pero aún cerca de la costa estos contenidos son bastante variables según que las precipitaciones tengan un origen marino (mayores contenidos) o bien continental, habiendo, por tanto, que considerar los vientos dominantes en cada momento. Esta variabilidad es también función de la altitud (Bakalowicz, op. cit.) ya que al aumentar ésta aumenta también la precipitación y, por tanto, la dilución.

En nuestro caso, los contenidos mayores de cloro y sodio (entre 5 y 11 mg/l. para el primero, y entre 2 y 3,5 mg/l. para el segundo) corresponden a las lluvias de la época estival (julio-octubre), hecho éste lógico si tenemos en cuenta que es precisamente en este período cuando las temperaturas ambientales son más altas, por tanto, mayores tasas de evaporación en la masa de agua oceánica próxima, y los fenómenos de dilución menos intensos (precipitaciones no demasiado importantes).

Por otra parte, el contenido en cualquier elemento en el agua de una surgencia está en función de los aportes del agua de lluvia, por una parte, y de las aportaciones que puede originar el medio rocoso como consecuencia de las reacciones químicas que puedan darse en la interfase líquido-sólido a lo largo del recorrido subterráneo del flujo de agua desde la zona de recarga a la de descarga. En el caso del cloro parece obvio pensar que los materiales carbonatados del macizo de Aramotz no pueden aportar tal elemento, por lo que resultaría que todo el cloro expulsado a nivel de las surgencias debe de tener un único origen, el meteórico. Ahora bien, los contenidos en este elemento en las nueve surgencias controladas es bastante superior al de las aguas de lluvia. La explicación de este fenómeno fue puesta de manifiesto por Schoeller (1962) y corroborada posteriormente por otros autores (Tripet, 1972; Miserez, 1973; Bakalowicz, 1979). Según Schoeller (op. cit.) una vez que el agua de precipitación alcanza el suelo puede quedar acumulada durante un tiempo más o menos prolongado en la zona superficial de alteración, más permeable, en la zona que Mangin (1975) ha denominado «acuífero epikárstico». En estas condiciones el agua está afectada por fenómenos de evapotranspiración, más o menos intensa según la época, **que conducen obligatoriamente a una reconcentración** en los elementos disueltos. De entre todos éstos, es el cloro el que mejor refleja este fenómeno en la surgencia, habida cuenta de que el resto sufre, o puede sufrir, modificaciones importantes tanto a nivel de la capa de alteración superficial (fenómenos modificadores debido a la acción de las plantas) como a lo largo del recorrido subterráneo hacia la surgencia (fenómenos de disolución-precipitación, intercambio iónico, etc.). Este debe ser, lógicamente, el mecanismo existente en Aramotz, en donde algunas surgencias de escaso caudal situadas en zonas elevadas pueden considerarse como salidas del acuífero epikárstico.

La evapotranspiración es, por tanto, la causa de la reconcentración en cloro, y ésta será tanto más intensa cuanto que el tiempo de estancia en la zona superficial sea mayor. A la vista de los resultados expuestos en la Tabla 1 referentes a los contenidos medios (m) en cada surgencia una subdivisión es posible: los manantiales 1, 6, 8 y 9 tienen contenidos medios comprendidos entre 8 y 9,5 mg/l., mientras que el resto los tienen entre 11 y 12 mg/l., excepción hecha del manantial 2, en el que es próximo a 15 mg/l. Esto implica que el acuífero epikárstico, causante de la reconcentración, no es uniforme a lo largo del macizo, y que en determinadas zonas las posibilidades de acumulación superficial son mayores, originando de esta manera, que en el momento de la infiltración hacia zonas más profundas (zona saturada) el agua aporte mayores contenidos en cloro.

Por otra parte, este contenido en cloro debería ser diferente de unas aguas de infiltración a otras (considerado un mismo sistema acuífero) en función de las condiciones previamente existentes. Así, en la época de lluvias invernal el tiempo de estancia en el acuífero epikárstico, debe ser reducido por el empuje de nuevas llegadas de agua y los fenómenos de evapotranspiración menos intensos, debido a las bajas temperaturas y a la menor actividad de las plantas, mientras que en la época estival, menos lluviosa, el tiempo de residencia debe ser más prolongado, a la vez que la tasa de evapotranspiración aumenta. Sin embargo, las variaciones en el contenido en cloro en las surgencias son pequeñas, como lo indica el coeficiente de variación (V), menor de 8 % en casi todos los casos (ver Tabla 1 y Figura 5).

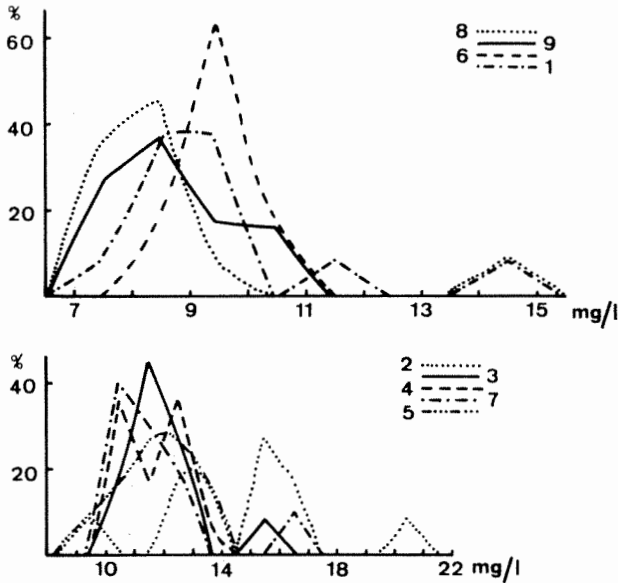


Figura 5.—Distribución de frecuencia para el cloro. 5.irudia.—Kloroaren kasurako maiztasun-banaketa.

A la vista de la Tabla 1 una matización es precisa. En la mayoría de los casos se han reconsiderado los datos desestimando algunos de ellos por corresponder, en buena lógica, a acontecimientos inusuales, muy específicos, que enmascaran las «verdaderas» variaciones debidas a un funcionamiento «normal» de los sistemas acuíferos. Así, los contenidos en cloro aparecidos en el muestreo del mes de enero en algunas surgencias, son relativamente altos y su toma en consideración modifica sensiblemente los valores del coeficiente de variación (V): la razón de esos contenidos elevados es perfectamente explicable a la luz de todo lo anteriormente expuesto. En efecto, a las anomalías lluvias torrenciales de agosto de 1983 siguió un periodo, también anómalo, de precipitaciones aisladas y de poca intensidad que abarcó hasta finales de diciembre; estas precipitaciones no significaron aumentos apreciables de caudal al nivel de las surgencias, a la vista de los hidrogramas correspondientes al manantial de Orúe (n.º 1), por lo que es lógico pensar que sirvieron para la acumulación de las aguas en la zona de alteración superficial, con la consiguiente reconcentración en elementos disueltos, fenómeno éste que se prolongó durante cerca de cuatro meses, y con una temperatura ambiente propia del periodo estival. A comienzos de enero de 1984 se originaron una serie de fuertes precipitaciones, con contenidos importantes en cloro (16 mg/l., la más alta del año 1984 en el pluviógrafo de Ereño), debido a la intensa evaporación previa que, presumiblemente, empujaron las aguas hasta ahora acumuladas en el epikarst hacia la zona saturada, merceda ya su capacidad por el prolongado estiaje; como consecuencia de este hecho alcanzan la surgencia aguas con un contenido anómalamente alto en cloro. Este tipo de acontecimientos no son, por ahora, frecuentes en nuestra climatología, por lo que, a pesar de tenerlos en cuenta, no se les puede considerar como usuales. De ahí que se hayan reelaborado los datos estadísticos desestimando estos valores. Como se puede observar en la Tabla 1, los valores medios (m) cambian poco al pasar de 11 a 9

el número de observaciones (n), mientras que las variaciones en el coeficiente de variación (V) son importantes. Son los datos referentes a n=9 los que, en lo sucesivo, se tendrán en cuenta.

Como antes se apuntaba, es razonable pensar que exista una importante variabilidad, si bien menor que en el agua de lluvia, en el contenido en cloro de las aguas de infiltración que llegan a la zona saturada. Sin embargo, este contenido se homogeniza antes de llegar a la surgencia, y esto, debe ser, razonablemente, debido a la existencia de un reservorio importante (en relación con el volumen de agua procedente de infiltración) que permite la mezcla de ambos tipos de agua, la previamente existente y la recién llegada, durante el tiempo necesario para su adecuada homogenización. Se pone así de manifiesto la función moduladora de la zona saturada, aunque ésta no sea de grandes dimensiones.

A la vista del esquema de fracturación del macizo de Aramotz expuesto en la Figura 2, es posible presentar una hipótesis sobre las zonas de recarga de las surgencias consideradas. Como se puede observar hay dos zonas de diferente intensidad de fracturación que se corresponden, aproximadamente, con la mitad norte y la mitad sur del macizo. Parece lógico pensar que en la zona más fracturada, mitad norte, en donde las formas exokársticas son más abundantes, la acumulación de agua de lluvia en la zona superficial sea menos importante que en la mitad sur, debido a una mayor facilidad de infiltración, con lo cual los efectos de la evapotranspiración, en igualdad de condiciones, serán menores, teniendo en cuenta, además, la casi nula presencia de vegetación en este sector. En consecuencia, las aguas aquí infiltradas tendrán contenido en cloro más bajo que las correspondientes a la mitad sur, en donde, lógicamente, el tiempo de estancia superficial debe ser más prolongado y, por tanto, la reconcentración más intensa. En la mitad norte se localizarían por tanto las zonas de recarga de las surgencias 1, 6, 8 y 9, y en la sur las de las surgencias 2, 3, 4, 5 y 7. En cualquier caso, es necesario señalar que la zona saturada de la mayoría de los sistemas debe estar lo suficientemente profunda como para que los efectos de la evapotranspiración no se dejen sentir. Sólo en el caso de los sistemas 2 y 5 (con variaciones más importantes en el contenido de cloro) se puede pensar en un flujo relativamente cerca de la superficie.

Teniendo en cuenta que la mayor parte de las salidas del macizo se localizan en su borde sur, hemos de suponer, para el caso de las surgencias cuya zona de recarga se sitúa en la mitad norte (caso 1 y 6), que la conexión hidráulica con la salida se realiza a través de fracturas, uniendo las zonas de recarga y descarga (Figura 2), pudiendo darse esta conexión independientemente de los sistemas (2, 3, 4, 5 y 7) localizados en la mitad sur. En el caso de las surgencias 9 y 8, en el sector oriental, la conexión hidráulica parece realizarse directamente a través de todo el medio rocoso. En la Figura 2 se señalan, mediante flechas, las posibles conexiones hidráulicas existentes entre las zonas de recarga y descarga de cada sistema.

### Bicarbonatos

El contenido medio en bicarbonatos en las aguas de lluvia analizadas (Tabla 1) es de 15 mg/l., aproximadamente, con valores que oscilan entre 2 y 44 mg/l. En este caso es evidente que los contenidos en este ión medidos en las surgencias (145-268 mg/l.) corresponden a las aportacio-

nes del propio medio rocoso carbonatado a partir de las reacciones químicas que se realizan en la interfase sólido-líquido. Es, en definitiva, el proceso de disolución del carbonato cálcico el responsable del apreciable incremento en bicarbonatos disueltos. Este proceso viene delimitado (Bakalowicz, 1979) por el sistema  $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O-CaCO}_3$  (sistema calco-carbónico) y está determinado por las velocidades de evolución propias a cada grupo de reacciones a realizar en las interfases gas-líquido-sólido:

- 1.—Transferencia de  $\text{CO}_2$  en la interfase gas-líquido.
- 2.—Reacciones químicas en la fase líquida.
- 3.—Transferencia de carbonato en la interfase líquido-sólido.

Se constata que la velocidad de evolución de las reacciones de los grupos 1 y 2 es bastante rápida (pocas horas) mientras que en las del grupo 3 el tiempo de respuesta puede ser, según las condiciones, de varios días (Bakalowicz, op. cit.). Según esto, es la variación de la presión parcial de  $\text{CO}_2$  atmosférico (grupo 1) la responsable del sistema calco-carbónico y, por tanto, de los fenómenos de disolución-precipitación de los carbonatos.

A la vista de los datos expuestos en la Tabla 1, dos cuestiones son a resaltar en Aramotz (Figura 6). De una parte, las variaciones en los contenidos en bicarbonatos, en general, son pequeñas, como lo indican los bajos valores del coeficiente de variación (V). Por otra parte, los contenidos más altos corresponden bien a las aguas que durante mayor espacio de tiempo han sufrido acumulación superficial. Vamos a tratar de explicar estos hechos.

Según la mayoría de los autores (Schoeller, 1962; Misez, 1973; Bakalowicz, 1978, 1979) la fuente esencial y general de  $\text{CO}_2$  se sitúa en la biosfera, es decir, es a nivel del suelo desarrollado sobre los afloramientos calizos en donde las aguas adquieren sus contenidos en  $\text{CO}_2$  disuelto. Según esto, parece lógico el que los mayores contenidos en bicarbonatos disueltos se encuentren en las aguas que se infiltran en la mitad sur del macizo, ya que, como en un epígrafe anterior se ha mencionado, es en esta zona en la

que se asienta una vegetación más abundante y, consecuentemente, la producción de  $\text{CO}_2$  debe ser mayor. El hecho de que en este sector las aguas residan mayor tiempo implica también una mayor reconcentración de  $\text{CO}_2$  disuelto a causa de una evapotranspiración más intensa. En este sentido, la zona de infiltración puede ser considerada como un vasto reservorio de  $\text{CO}_2$  (Bakalowicz, 1979).

Por otra parte, el agua de infiltración lenta es particularmente sensible a las variaciones de la  $p\text{CO}_2$  del aire (reacciones del grupo 1) al ser un flujo eminentemente difásico, es decir, agua + aire. El hecho de que las variaciones en bicarbonatos disueltos no sean grandes es debido a la «inercia» del sistema y, particularmente, a la existencia de una zona saturada lo suficientemente importante para amortiguar tanto las variaciones de la  $p\text{CO}_2$  atmosférica como las de la producción irregular de  $\text{CO}_2$  a nivel de la vegetación. En consecuencia, en la mitad sur del macizo, en donde el acuífero epikárstico está más desarrollado, los fenómenos de disolución de los carbonatos se darían, fundamentalmente, en dicha zona superficial, habiendo perdido el agua su agresividad una vez que se filtra hacia zonas más profundas.

En la mitad norte, al contrario, predomina la infiltración rápida; las aguas aportan cantidades menores de  $\text{CO}_2$  hacia las zonas profundas y es a este nivel que procederán a la disolución de la roca, alcanzando la saturación con contenidos más bajos que las aguas de infiltración lenta. La existencia de importantes zonas saturadas en estos sistemas implica también una buena homogenización en dichos contenidos. En cualquiera de los dos casos, infiltración rápida o lenta, el flujo de agua en las zonas profundas de los sistemas respectivos es lento como lo demuestra el hecho de que a nivel de las surgencias las aguas están saturadas, o ligeramente sobresaturadas, siendo este último el caso de las aguas de infiltración lenta, lo que indicaría una pérdida en la  $p\text{CO}_2$  asociada a la solución en las proximidades de la surgencia.

Resumiendo lo dicho hasta ahora, se observan unas conclusiones que son válidas tanto en la interpretación de las variaciones de los contenidos en cloro como en bicarbonatos, en lo que a modalidades de infiltración, importancia del epikarst e importancia de la zona saturada se refiere. En cuanto a los fenómenos de karstificación se podría decir que éstos se producen actualmente en profundidad en la mitad norte del macizo, y en zonas superficiales en la mitad sur. Sin embargo, y aunque como ya se ha mencionado, es el sector norte el que presenta mayor abundancia de formas exokársticas, concluiríamos diciendo que éstas no corresponden a fenómenos actuales, y que son consecuencia de procesos anteriores, poniendo así de manifiesto un carácter importante en el estudio hidrogeológico de los sistemas kársticos: **la funcionalidad** (Mangin, 1975).

### Conductividad y mineralización

Todo lo dicho hasta ahora sobre los efectos de modulación de los sistemas kársticos, es decir, de su inercia, es también válido cuando nos referimos al contenido total en elementos disueltos y a la conductividad de las aguas del macizo de Aramotz. No volvemos sobre el asunto. Se trata aquí, simplemente, de poner de manifiesto la relación que une ambas variables en este estudio concreto y de compararla con los casos que, al respecto, aparecen en la literatura.

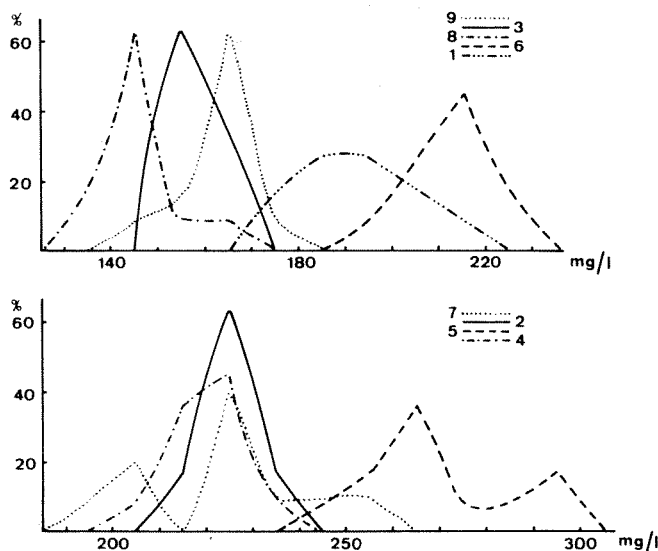


Figura 6.—Distribución de frecuencia para los bicarbonatos. 6.irudia.—Bikarbonatoen kasurako maiztasun-banaketa.



La mineralización (M) de las aguas que drenan el macizo de Aramotz (ver Tabla 1) oscila entre 250 y 500 mg/l., aproximadamente, lo que es conforme con los datos relativos a otras regiones kársticas, yugoslavas (Milanović, 1981), del Pirineo central (Bakalowicz, 1974) y del Jura franco-suizo (Miserez, 1973). Por otra parte, la conductividad (C) oscila también dentro del mismo intervalo. Al ser la mineralización (C) función a la vez del contenido global en iones disueltos (M) y de la naturaleza de los mismos, se establece una relación lineal de la forma:

$$M(\text{mg/l.}) = K.C \text{ (}\mu\text{S)},$$

donde K es una constante que, según Hem (1970) está comprendida entre 0,60 y 0,82. Para Bakalowicz (1974) en los sistemas kársticos por él estudiados, el valor de esta constante es algo más elevado, pudiendo llegar hasta 0,99, si bien, pone de manifiesto que la relación entre la mineralización y la conductividad no es única para el conjunto de las aguas kársticas, sino que cada sistema puede estar caracterizado hidroquímicamente por un coeficiente K propio.

Para los sistemas de Aramotz K adquiere un valor comprendido entre 0,92 y 1,00, próximo al dado por Bakalowicz (op. cit.) para algunos karsts del Pirineo central. Según esto, el contenido total en elementos disueltos en estas aguas puede fácilmente deducirse a partir del conocimiento de la conductividad, parámetro éste cuya medida in situ no ofrece ninguna dificultad. De igual manera podrían deducirse los contenidos aproximados de cada ión disuelto conociendo la relación que lia cada uno de ellos con la mineralización.

Algunos autores (Schuster y White, 1971; Ternan, 1972; citados en Bakalowicz, 1979) han tratado de poner de manifiesto el grado de karstificación funcional de los acuíferos kársticos en base a las variaciones observadas en la mineralización de las aguas a lo largo de un muestreo anual a paso de tiempo mensual o bimensual. Según dichos autores, aguas cuyas mineralizaciones poseen un coeficiente de variación elevado (hasta el 25 %) son propias de sistemas acuíferos en los que la circulación se realiza, preferentemente, a través de amplios conductos (**conduit flow system**), mientras que variaciones próximas al 5 % caracterizan sistemas en los cuales el flujo se realiza, fundamentalmente, a través de pequeñas fisuras (**diffuse flow system**). Tratan, de esta manera indirecta, de reflejar el posible grado de karstificación funcional existente en el sistema.

A la vista de lo precedente y habida cuenta de los datos aquí considerados (Tabla 1), parece lógico pensar que el

macizo de Aramotz no posee un grado alto de karstificación, como lo prueba, en parte, la no existencia de redes espeleológicas desarrolladas, tan frecuentes y conocidas en macizos litológicamente semejantes próximos, como es el caso de Itxina (Sáenz de Echenique y Cruz-Sanjulián, 1980). A favor de tal consideración está también el estudio detallado de los hidrogramas correspondientes al manantial de Orue (n.º 1), como ya se indicó en un trabajo precedente (Antigüedad et al., 1984).

## CONCLUSIONES

El estudio sistemático durante el año 1984, a paso de tiempo mensual, del quimismo de las surgencias del macizo kárstico de Aramotz ha proporcionado datos de interés para el mejor conocimiento del funcionamiento hidrogeológico y de las características de karstificación funcional del mismo.

Las variaciones de algunos elementos, del cloro, fundamentalmente, medidos a nivel de los manantiales, pone de manifiesto la existencia de un acuífero epikárstico de desigual importancia en el macizo, siendo este acuífero de gran importancia en la posterior evolución química de las aguas, ya que implica dos modalidades diferentes de infiltración, rápida y lenta. La variación en los contenidos en bicarbonatos disueltos, por otra parte, es también una prueba a favor de dicho mecanismo modulador, y aporta, además, datos de interés para el conocimiento de la sede actual de los fenómenos de disolución de la roca (procesos de karstificación), que se desarrollan en superficie o en profundidad según las zonas del macizo. El conocimiento previo de la fracturación y de la desigual repartición de la vegetación en el mismo ayuda, en forma importante, a la interpretación de los datos hidroquímicos. Estos ponen en evidencia la existencia en el macizo de Aramotz de dos mecanismos moduladores de la información de entrada, en lo que al quimismo de las aguas se refiere: el ya mencionado acuífero epikárstico y una importante zona saturada para cada sistema acuífero investigado, considerando esta última en función del volumen global del agua puesto en juego en cada uno de los sistemas. Por último, se establece una relación entre la conductividad y la mineralización total de las aguas, de la forma  $M \text{ (mg/l.)} = K.C \text{ (}\mu\text{S)}$ , que en Aramotz supone una K comprendida entre 0,92 y 1. Como consecuencia de todo lo expuesto se deduce un grado bajo de karstificación para el macizo considerado, siendo la circulación predominante del tipo «diffuse flow system».

## BIBLIOGRAFIA

- ANDRIEUX, C.: 1978. *Les enseignements apportés par la thermique dans le karst*. Le karst: son originalité physique, son importance économique. Colloque de TARBES. Association des géologues du Sud-Ouest (AGSO), p. 48-63.
- ANTIGÜEDAD, I.; CRUZ-SANJULIAN, J., y ERASO, A.: 1983. *Primeros datos sobre el hidrograma y las características hidrogeoquímicas del manantial de Orue (Yurre, Vizcaya)*. III Simposio de Hidrogeología, t. 9, p. 559-568.
- ANTIGÜEDAD, I.; ERASO, A., y CRUZ-SANJULIAN, J.: 1984. *Análisis e interpretación de las curvas de recesión correspondientes a dos surgencias kársticas en la provincia de Bizkaia*. I Congreso Español de Geología. Segovia, Tomo IV, p. 17-27.
- BAKALOWICZ, M.: 1974. *Géochimie des eaux d'aquifères karstiques. 1. Relation entre minéralisation et conductivité*. Ann. Spéléol., 1974, 29, 2, p. 167-173.
- BAKALOWICZ, M.: 1978. *Apports de l'hydrogéochimie à la connaissance de l'aquifère karstique, de sa genèse et de son fonctionnement*. Le karst: Son originalité physique, son importance économique. Colloque de TARBES. Association des géologues du Sud-Ouest (AGSO), p. 69-84.
- BAKALOWICZ, M.: 1979. *Contribution de la géochimie des eaux à la connaissance de l'aquifère karstique et de la karstification*. Thèse, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI, 269 pp.
- CRUZ-SANJULIAN, J., y SAENZ DE ECHENIQUE, F.: 1980. *Consideraciones preliminares sobre la Hidrogeología del karst de Itxina (Vizcaya). Estimación del coeficiente de infiltración y de la evapotranspiración real*. Estudios geol., 36, p. 281-287.
- GEZE, B.: 1973. *Lexique des termes français de spéléologie physique et de kartologie*. Ann. Spéléol., 28, 1, p. 1-20.
- HEM, J. D.: 1970. *Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water*. U. S. Geol. Survey, water-supply paper 1473, 363 pp.
- JACQUET, J.: 1971. *Aspects généraux de la représentation mathématique des phénomènes en hydrologie de surface*. La Houille Blanche, 2, p. 105-110.
- MANGIN, A.: 1975. *Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques*. Ann. Spéléol., 29, 3, p. 283-332; Ann. Spéléol., 29, 4, p. 495-601; Ann. Spéléol., 30, 1, p. 21-124.
- MILANOVIC, P. T.: 1981. *Karst Hydrogeology*. WRP.
- MISEREZ, J. J.: 1973. *Géochimie des eaux du karst jurassien*. Thèse. Université de Neuchâtel (Suiza). 313 pp.
- MÜLLER, I.; SCHOTTERER, V., y SIEGENTHALER, U.: 1982. *Etude des caractéristiques structurales et hydrodynamiques des aquifères karstiques par leurs réponses naturelles et provoquées*. Eclogae geol. Helv., 75, 1, p. 65-75.
- RAT, P.: 1959. *Les pays crétacés basco-cantabriques (Espagne)*. Publ. de l'Université de Dijon, XVIII, Presses Universitaires de France. 525 pp.
- ROUCH, R.: 1978. *Le système karstique et son unité biologique*. Le karst: son originalité physique, son importance économique. Colloque de TARBES. Association des géologues du Sud-Ouest (AGSO), p. 38-47.
- SCHOELLER, H.: 1962. *Les eaux souterraines*. Masson, Paris, 642 pp.
- TRIPET, J. P.: 1972. *Etude hydrogéologique du bassin de la source de l'Areuse (Jura neuchâtelois)*. Thèse. Université de Neuchâtel (Suiza), 183 pp.