

## **REACCIONES AGUA-ROCA EN LA CUENCA ALTA DE LOS RÍOS ISUELA Y FLUMEN (HUESCA)**

Domingo MONAJ<sup>1</sup>  
José Luis VILLARROEL<sup>2</sup>  
José Antonio MANSO<sup>3</sup>  
José Antonio CUCHÍ<sup>2</sup>

RESUMEN.— El Prepirineo del Alto Aragón está formado por rocas carbonatadas cuya interacción con el agua de lluvia las transforma en agua de fuentes a través de procesos kársticos. El presente artículo presenta los resultados de diversos experimentos de la interacción entre muestras de agua de lluvia y diversas rocas de la zona.

ABSTRACT.— The Prepirinean range of Alto Aragón is formed by carbonate rocks. Their interaction with rainwater produces springwater through karst processes. The present paper describes the results of several experiments of interaction of samples of rainwater and several local rocks.

KEY WORDS.— Water, rock, interaction, Prepyrenees, Huesca (Spain).

### INTRODUCCIÓN

Una parte importante del Prepirineo del Alto Aragón está formada por rocas carbonatadas, en las que domina el carbonato cálcico. Hay abundantes

---

<sup>1</sup> C/ Alta, s/n, E-22193 NUENO. dmt\_nueno@yahoo.es

<sup>2</sup> Grupo de Tecnologías en Entornos Hostiles (GTE). Instituto Universitario de Investigación en Ingeniería de Aragón (I3A). Edificio I+D+i. Universidad de Zaragoza. C/ Mariano Esquillor, s/n, E-50018 ZARAGOZA. cuchi@unizar.es, jlvilla@unizar.es

<sup>3</sup> Escuela Politécnica Superior de Huesca. Universidad de Zaragoza. Carretera de Cuarte, s/n, E-22071 HUESCA. manso@unizar.es

rasgos kársticos donde la infiltración del agua de lluvia a través de las rocas genera aguas subterráneas que afloran en diversos manantiales de química característica. Sin embargo, hay poca información sobre las características geoquímicas de las calizas del Prepirineo, así como sobre la interacción entre estas y el agua. Este es un tema de cierto interés por sus implicaciones. En esta línea, la bibliografía presenta varios ejemplos en otras zonas del mundo sobre formación de suelos, calidad de las aguas superficiales y subterráneas (NADLER y cols., 1980; LIU y cols., 2004), y en alteración de rocas y monumentos (FIGUEIREDO y cols., 2000; CARDELL-FERNÁNDEZ y cols., 2002).

Este artículo tiene como objetivo presentar información sobre las características de muestras representativas de aguas y rocas del Prepirineo central del Alto Aragón. Además, se han realizado tres tipos de ensayos intentado reproducir la interacción agua-roca.

#### ZONA DE ESTUDIO

El presente artículo se centra en las Sierras Exteriores o Prepirineo (fig. 1). Estas están formadas por una serie de alineaciones de mediana altura entre las depresiones intrapirenaicas y la tierra llana. Vista desde esta última, la zona de estudio presenta un desnivel muy característico y francamente abrupto de centenares de metros. En el pie meridional, Nueno está a 727 msnm, Apiés a 678 metros, San Julián de Banzo a 744 y La Almunia del Romeral a 834. La cima del tozal de Guara alcanza los 2078 metros, pero la mayoría de las sierras cercanas culminan entorno a los 1500 metros: Gratal, 1543; Mediodía, 1452; La Calma, 1581; Puicuto, 1373; Águila, 1619, y Matapaños, 1532. Al norte, hay una serie de sierras de areniscas de menor altura, Bonés (1608 metros) y Lopina (1467 metros), que dan paso al valle del Guarga, con pequeñas localidades como Molino Villobas (788 metros) y Lanave (720 metros). Para complicar un poco más la topografía, entre las sierras aparecen incrustadas las depresiones de Rasal – Bentué de Rasal, Arguis, Belsué y Nocito-Used.

El clima es mediterráneo continental. Las precipitaciones medias oscilan entre 600 y 1000 milímetros y las temperaturas medias entre 10 y 13 °C: 674 milímetros y 13,1 °C en Apiés; 694 milímetros y 12,8 °C en Nueno; 793



Fig. 1. Zona de trabajo.

milímetros y 12,2 °C en San Julián de Banzo; 1047 milímetros y 10,7 °C en la Casa de Administración del embalse de Belsué; 702 milímetros y 10,3 °C en Hostal de Ipiés; 808 milímetros y 10,7 °C en Aineto (DEL VALLE, 1997). Es necesario considerar que son datos de estaciones manuales, y que corresponden a periodos heterogéneos. Hay que reseñar, por otro lado, la ausencia manifiesta de estaciones termopluviométricas en alturas superiores a los 1000 metros, donde es razonable que se alcancen temperaturas menores y pluviometrías mayores. Un tema de cierto interés es el singular valor de pluviometría en Belsué, superior al resto de las estaciones.

La vegetación, estudiada por MONTSERRAT (1986), es de tipo mediterráneo: abundan la encina y el pino carrasco en el arbolado de las caras meridionales. En las caras norte del Peiró, Águila y barranco de la Pillera, aparece el pino silvestre y el haya. A nivel arbustivo dominan el boj y la coscoja. Las zonas abandonadas de cultivos están colonizadas por aliagas y artos espinosos. Las crestas altas y venteadas están cubiertas por arizones.

Geológicamente está conformada por materiales del Mesozoico inicial (facies Keuper y Muschelkalk), Cretácico superior, Eoceno medio y Oligoceno (MILLÁN, 2006; MONTES, 2009). Hasta el Eoceno medio abundan las calizas. A partir de este predominan facies terrígenas como las margas de Arguis y Belsué y las areniscas del Monrepós. En estas últimas rocas, el contenido en carbonato cálcico es importante. Los conglomerados y areniscas del Mioceno del valle del Ebro, en el margen meridional de las sierras, también tienen un alto contenido en el mencionado mineral. En las calizas son muy abundantes los rasgos kársticos, estudiados por RODRÍGUEZ VIDAL (1986) y otros autores. Datos hidroquímicos de los manantiales asociados al karst de la zona se presentan en BUERA y cols. (1997) y PUYAL y cols. (1998). Un manantial muy estudiado en la zona es el de Fuenmayor, en San Julián de Banzo (VILLARROEL y CUCHÍ, 2002 y 2004; VILLARROEL y cols., 2002; OLIVÁN, 2013).

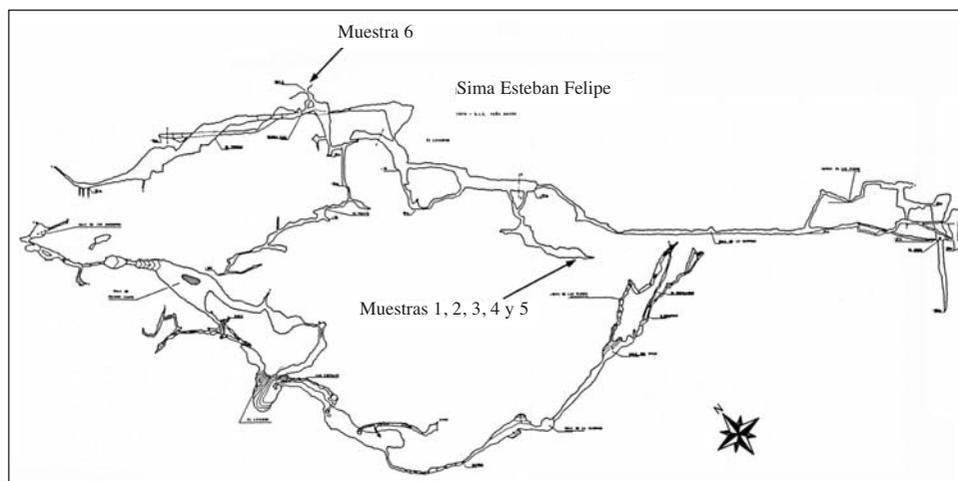
#### MUESTREOS Y MÉTODOS ANALÍTICOS

Para el presente estudio se muestrearon rocas y aguas de la zona. La ubicación de las rocas muestreadas en el primer trimestre de 2002 y una mínima descripción se presentan en la tabla I.

Es una primera selección, a criterio de los autores, a partir de su conocimiento del territorio. En su mayor parte son calizas del Prepirineo, del Muschelkalk, el Cretácico superior y el Eoceno medio (formación Guara). Un primer grupo (muestras 1 a 6) está formado por espeleotemas y calizas de la cueva de Esteban Felipe, en las proximidades del embalse de Santa María de Belsué. La ubicación detallada de estas se presenta en la figura 2. Un segundo grupo (muestras 7 a 10) corresponde a calizas y areniscas del entorno del manantial de Fuenmayor, en San Julián de Banzo. Un tercer grupo son rocas del entorno de la presa de Arguis y la cercana cueva de Sanclemente. Las dos últimas corresponden a las rocas del final del congreso del Isuela. Para los análisis y experimentos se ha partido de rocas molidas como equivalente a suelo derivado de las mismas, en una aproximación que debiera ser analizada con mayor detalle mediante un trabajo específico. Las muestras se molieron en un molino de mandíbulas y se tamizaron en tamiz de luz de 2 milímetros. En la muestra molida se determinaron el contenido en carbonato cálcico mediante calcímetro de Bertrand

**Tabla 1.** Rocas muestreadas, coordenadas y descripción.

	<i>Tipo de roca</i>	<i>Coordenadas H30T</i>			<i>Descripción</i>
1	Estalactita	717850	4686850	860	Zona del sifón. Cueva de Esteban Felipe
2	Estalagmita	717850	4686850	860	Igual que la muestra anterior
3	Cresta estalagmítica	717850	4686850	860	Igual que la muestra anterior
4	Caliza	717850	4686850	860	Igual que la muestra anterior. Eoceno
5	Caliza	717850	4686850	860	Igual que la muestra anterior. Eoceno
6	Caliza	717850	4686850	860	Lenera en la boca de la cueva de Esteban Felipe. Eoceno
7	Caliza	718600	4679700	720	San Julián de Banzo. Pista a Fuenmayor. Eoceno
8	Arenisca	718600	4679700	720	San Julián de Banzo. Pista a Fuenmayor. Mioceno
9	Caliza	719050	4678790	710	Manantial de Fuenmayor. Eoceno
10	Caliza	719750	4678300	840	Cantera, junto a Pirotecnia. Cretácico
11	Marga	712000	4686720	925	Arguis, junto a la muestra de agua 7. Eoceno
12	Caliza	712000	4686720	925	Arguis, San Clemente. Eoceno
13	Caliza	712100	4687000	960	Arguis, junto a la presa. Eoceno
14	Caliza	712200	4684120	800	Fuente de la Ralleta. Muschelkalk
15	Caliza	712260	4684840	860	Junto a la fuente de la Cantera. Muschelkalk

**Fig. 2.** Muestras en la cueva de Esteban Felipe. Mapa del Grupo de Exploraciones Subterráneas Peña Guara.

y el pH de una suspensión de 10 gramos de roca en 25 milímetros de agua (1 : 2,5) tras media hora de contacto.

Además, se recogieron aguas de lluvia en la localidad de Nueno en diversos episodios entre el 1 de marzo y el 9 de julio de 2002 con un embudo limpio de plástico y botellas nuevas de plástico. El pH se determinó mediante pHmetro Orión 290 A portátil, con un electrodo de vidrio Ingold con compensación de temperatura mediante el oportuno calibrado con los correspondientes tampones. La conductividad eléctrica (CE) se estableció con conductímetro Orión 122.

Para conocer casos reales, se recogió una serie de muestras de aguas superficiales y subterráneas en la misma época. La ubicación de estas se muestra en la figura 1 y en la tabla II. Las aguas superficiales y subterráneas se recogieron en botellas nuevas de PET de dos litros de capacidad con llenado hasta la misma embocadura. Se procede a su transporte de inmediato en nevera portátil a los laboratorios de la Escuela Politécnica Superior de Huesca donde se conservaron en la oscuridad a 4 °C. En campo se determinó la CE y temperatura del agua mediante un conductímetro Orión 122. También

**Tabla II.** Puntos de agua, fecha, coordenadas y descripción de puntos de agua muestreados.

	Nombre	Fecha de muestreo	Coordenadas UTM H30T			Descripción
			X	Y	Z	
1	Fuendebién	6/3/2002	717960	4681430	910	C. San Julián de Banzo a Salto de Roldán
2	Val	6/3/2002	718840	4680390	760	Rezumen próximo al barranco de San Martín
3	Escarbe	6/3/2002	717380	4677720	670	Camino de Apiés a San Julián
4	Fuente del Plano	6/3/2002	717390	4678000	660	Próxima a Escuarbe, en un campo
5	Fuenmayor	6/3/2002	719050	4678790	710	San Julián de Banzo. Abastece a Huesca
6	Fuente de Dos Caños	6/3/2002	719000	4678300	710	San Julián de Banzo, cerca de la iglesia
7	Marga de Arguis	22/2/2002	712000	4686720	925	Cerca de la entrada a la cueva de San Clemente
8	Pantano de Arguis	22/2/2002	712100	4687000	960	En la misma orilla del embalse del mismo nombre. Embalse al 40%
9	Fuente de la Ralleta	12/3/2002	712200	4684120	800	Antigua carretera. Km 17. Abrigo
10	Fuente de la Canera	12/3/2002	712260	4684840	860	Antigua carretera. Km 17,9. Muro
11	Cueva de Esteban Felipe		717850	4686850	860	Agua de la cueva de Esteban Felipe

se determinó el oxígeno disuelto mediante un oxímetro YSI 55-50. Además, se recogió agua de lluvia en un contenedor nuevo de polietileno, con un embudo de plástico nuevo para realizar ensayos de reacción agua-roca.

Las aguas superficiales y subterráneas se estudiaron con más detalle que el agua de lluvia. Potencial redox, pH y alcalinidad se determinaron en laboratorio en un plazo inferior a 24 horas. El pH mediante un pHmetro Orión 290 A portátil con un electrodo de vidrio Ingold de pH con compensación de temperatura, así como con el oportuno calibrado con los correspondientes tampones. El eH se determinó mediante el mismo equipo, el electrodo correspondiente con puente de KCl y tampón redox de 481 mV. La alcalinidad se determinó por valoración con solución de ácido sulfúrico diluido y naranja de metilo. La solución ácida se contrastó con una disolución de hidróxido sódico recién preparada valorada con biftalato potásico. Los iones sodio, potasio, calcio, bario y litio se establecieron en un fotómetro de llama Jenway PFP7. El ion magnesio por complexometría con AEDT. Los cloruros, por el método de Möhr mediante valoración argentométrica con cromato potásico como indicador. Los nitratos por medio de espectrofotometría de absorción molecular UV-Visible en un UNICAM Helios Épsilon sobre muestra acidificada con HCl. Los sulfatos por turbidimetría por precipitación con BaCl<sub>2</sub> en solución de Tween 20 y medio ácido en un espectrofotómetro de absorción molecular UNICAM Helios Épsilon. La sílice también por espectrometría en el ya citado espectrofotómetro de absorción molecular UNICAM Helios Épsilon, en medio ácido, con molibdato amónico, EDTA, ácido tartárico y sulfito sódico. No se han determinado metales pesados dado que estudios previos han mostrado que están prácticamente ausentes en este tipo de aguas. Los datos analíticos de las aguas se trataron mediante el programa de especiación WATEQ4F, del US Geological Survey. Los diagramas de Stiff y Piper se realizaron mediante el programa Aquachem, de Waterloo Hydrologic.

A partir del agua de lluvia recogida y las rocas molidas, se estudió la interacción agua de lluvia-roca mediante tres tipos de experimentos: (1) contacto agua-roca sin agitación, (2) contacto agua-roca con agitación, (3) contacto roca-agua por percolación. Dentro de este último caso se han realizado pruebas aisladas teniendo en cuenta el efecto del secado y del espesor del lecho. En el primer caso, se intenta simular el proceso de interacción en un charco

de agua superficial. Con el segundo, la interacción en una corriente de agua, superficial o subterránea. En ambos casos, el experimento se considera abierto, dado que la solución está en contacto con la atmósfera y puede captar cuanto dióxido de carbono considere conveniente. Con el tercero, se estudia la percolación del agua de lluvia a través del suelo, simulando un proceso natural de recarga de un acuífero.

En el primer experimento se utilizaron 200 milímetros de agua y 100 gramos de roca molida, manteniéndose la mezcla durante unos 5 días. La disolución de roca se controla por medición de la conductividad eléctrica de la solución mediante el conductímetro ya descrito, inicialmente en cortos periodos de tiempo que luego se aumentan a 12 y 24 horas.

La serie de experimentos de contacto agua-roca con agitación se ha realizado a partir de la mezcla de 200 milímetros de agua de lluvia y 100 gramos de roca molida en un agitador magnético con un imán recubierto de teflón. Al igual que la serie de experimentos anterior, se controla la disolución de la roca mediante la medición de la CE a intervalos dados de tiempo.

El tercer tipo de experimentos se ha realizado por percolación de agua de lluvia a través de un espesor dado de roca molida. Se ha utilizado un tubo de PVC de 0,5 metros de longitud y 2 centímetros de diámetro, unido mediante material aislante a una preforma también de PVC de 10 centímetros de longitud e igualmente 2 centímetros de diámetro con un pequeño orificio en el fondo. El espesor del suelo por el que se va a infiltrar el agua será de 60 centímetros. Tubo y preforma se rellenaron con la roca molida y seca sin utilizar ningún tipo de instrumento para favorecer la compactación. Sobre el conjunto indicado se coloca una bureta graduada con agua de lluvia y se provoca un flujo constante de dicha agua sobre la parte superior mediante un gotero clínico. En la parte inferior se recoge el agua. En esta, a periodos dados, se ha medido la CE de forma singular para diferentes fracciones de volumen percolado. El volumen mínimo de medición era de 9 mililitros.

El volumen percolado se ha revelado en función de la naturaleza de la roca y conductividad hidráulica de la columna experimental. En algún caso —muestras del interior de la cavidad Esteban Felipe—, el volumen de roca muestreada fue insuficiente para rellenar todo el equipo. Se ha realizado también un experimento adicional con la caliza 13, de la que se tomó, por

razones logísticas, una masa de varios kilogramos. Por un lado, se ha realizado un experimento para estudiar el efecto de una fase de secado dentro del proceso de percolación. Así, una vez realizado un primer proceso de percolación se ha procedido al secado en estufa a 50 °C, entendiendo este valor como la temperatura extrema que podría alcanzar la roca en el medio natural. Posteriormente, se ha vuelto a realizar otro proceso de percolación para comparar si variaciones en el espesor pueden influir en el resultado. Se han realizado pruebas con diferentes masas de roca molida (49,7, 62,7, 79,4, 108,1, 151,1 y 197,6 gramos, respectivamente).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### *Rocas*

La tabla III presenta los valores de pH y porcentaje de carbonato cálcico para las rocas muestreadas. Como era de esperar, la mayor parte de las muestras de rocas presentan un alto contenido de carbonato cálcico. Los espeleotemas son prácticamente calcita pura al igual que la mayoría de las calizas de la cueva de Esteban Felipe. Otras calizas del Eoceno presentan también valores muy altos. Los menores contenidos aparecen en las muestras de marga de Arguis y de arenisca de San Julián de Banzo (34 y 54%, respectivamente). El primer valor indica que el contenido está en el límite entre una arcilla calcárea y una marga propiamente dicha. Todos los valores de pH obtenidos superan el valor de 9,0. Es un valor sorprendentemente alto, dado que las soluciones de caliza en agua dan valores de pH entre 8 y 9,0 (OATES, 1998). Sin embargo, este valor se puede elevar por la presencia de dolomita (STEVENS y CARRON, 1948) o por efecto de la molienda y rotura de cristales (CONDE y cols., 2007, 2009). Estos resultados necesitarían de un estudio más detallado.

### *Aguas de lluvia*

Como se ha señalado se recogieron aguas de diferentes eventos de lluvia en Nueno, algunas de cuyas características se muestran en la tabla IV, para utilizarlas como reactivo para estudiar la reacción entre esta y las muestras de roca. Es de señalar, que solo se utilizaron las aguas recogidas en los cuatro primeros eventos. Las aguas de lluvia analizadas son ligeramente

ácidas. Son valores normales que se encuentran dentro del rango habitual de precipitaciones analizadas en la Escuela Politécnica Superior de Huesca (datos no publicados). Además, son valores superiores a 5,5, que se indica como valor límite entre lluvia ácida y agua de lluvia con CO<sub>2</sub> disuelto. Cabe reseñar que la CE de los eventos de primavera es inferior a los del verano, lo que indica probablemente una menor presencia de polvo en la atmósfera.

**Tabla III.** Resultados analíticos de las rocas muestreadas.

	<i>Tipo</i>	<i>Localidad</i>	<i>pH</i>	<i>Carbonato cálcico (%)</i>
1	Estalactita	Cueva de Esteban Felipe	9,54	100
2	Estalagmita	Cueva de Esteban Felipe	9,61	100
3	Costra estalagmítica	Cueva de Esteban Felipe	9,34	100
4	Caliza	Cueva de Esteban Felipe	9,27	100
5	Caliza	Cueva de Esteban Felipe	9,43	96
6	Caliza	Cueva de Esteban Felipe	9,25	100
7	Caliza	San Julián de Banzo	9,17	87
8	Arenisca	San Julián de Banzo	9,31	54
9	Caliza	San Julián de Banzo	9,40	100
10	Caliza	San Julián de Banzo	9,56	89
11	Marga	Pantano de Arguis	9,14	34
12	Caliza	Cueva de Sanclemente	9,45	100
13	Caliza	Arguis	8,56	94
14	Caliza	Fuente de la Ralleta	9,49	99
15	Caliza	Fuente de la Cantera	9,55	82

**Tabla IV.** Características de la lluvia en Nueno entre marzo y junio de 2002.

<i>Fecha</i>	<i>Precipitación en milímetros</i>	<i>pH</i>	<i>Conductividad (μS/cm 25 °C)</i>
1-3-2002	20	6,92	14,6
14-3-2002	14,1	6,30	15,8
16-3-2002	28	6,44	20,5
1-4-2002	15	6,24	19,4
22-5-2002	12		41
4-6-2002	12		44
8-7-2002	35		28
9-7-2002	11		31

*Aguas superficiales y subterráneas*

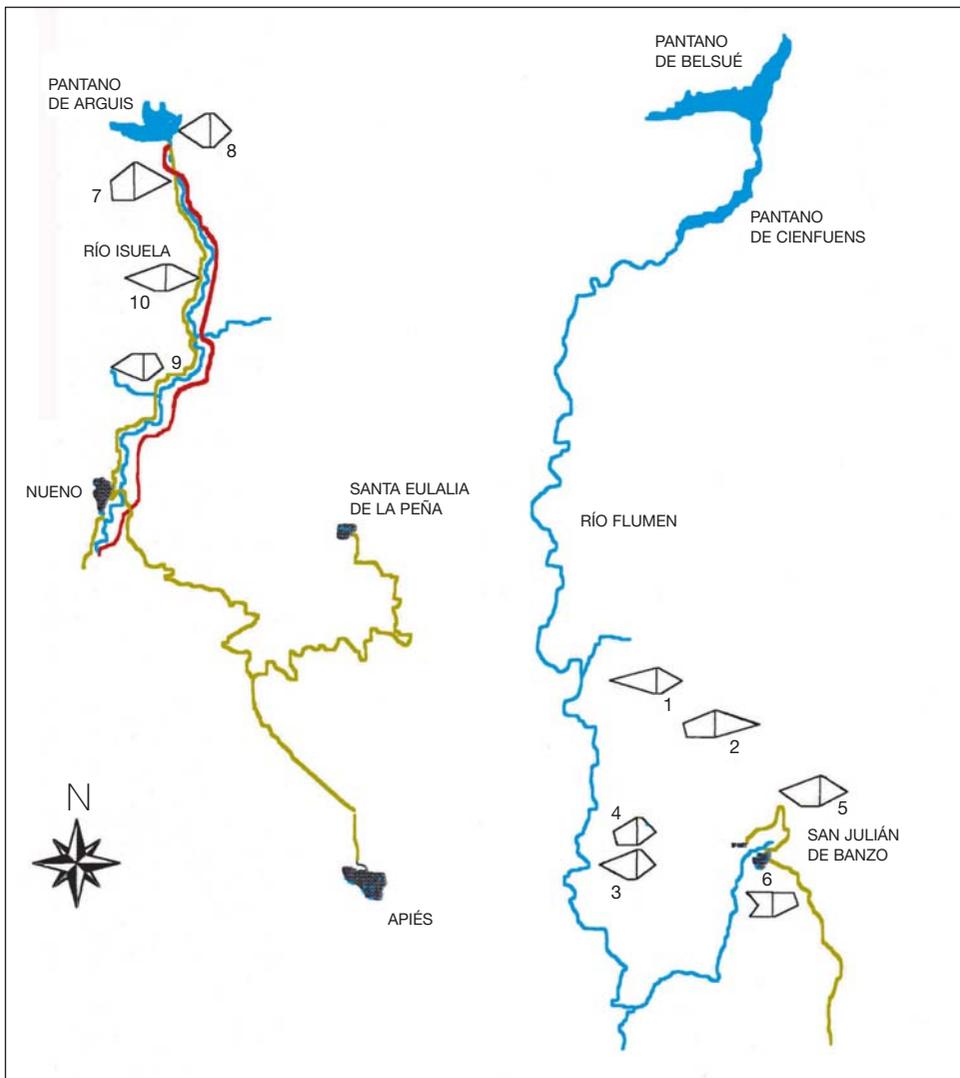
Las analíticas de aguas superficiales y subterráneas se muestran en la tabla v. Son datos similares a los presentados por BUERA y cols. (1977), PUYAL y cols. (1998) y CUCHÍ y cols. (1999). Estas aguas tienen conductividad moderada, pH ligeramente básico, con presencia de oxígeno disuelto, y un potencial redox positivo.

**Tabla v.** Características analíticas de aguas de manantial del Prepirineo.

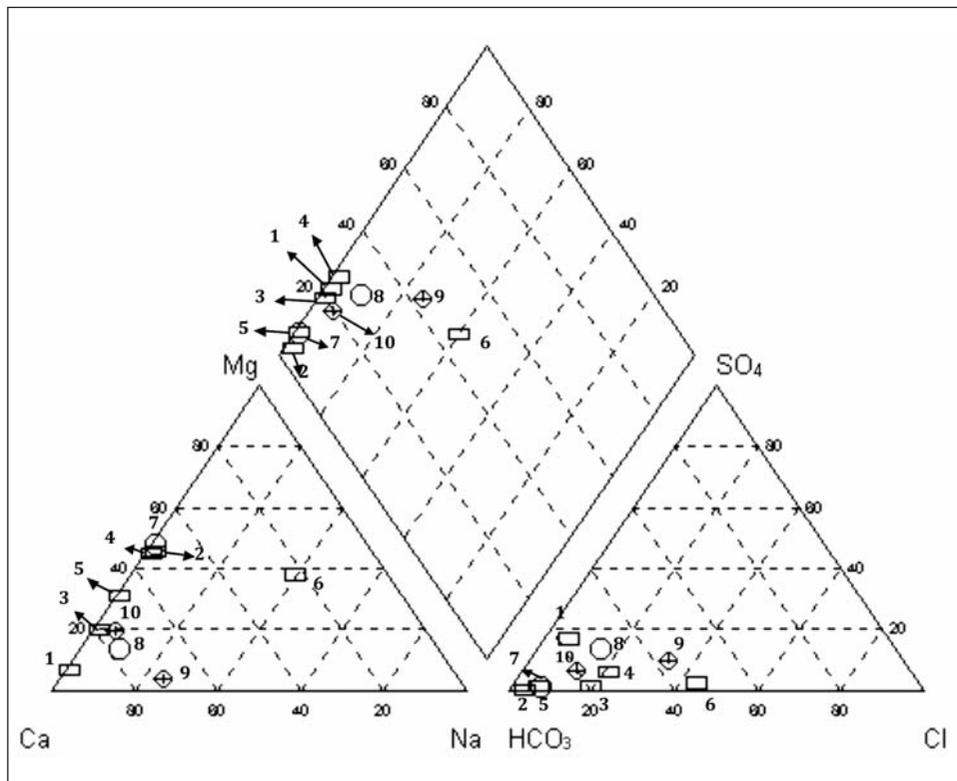
	Temp. (°C)	pH	CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	eH (mV)	Na <sup>+</sup> (mg/l)	K <sup>+</sup> (mg/l)	Mg <sup>2+</sup> (mg/l)	Ca <sup>2+</sup> (mg/l)
Fuendebién	13,5	7,2	697	264,1	2,34	1,91	6,06	144,22
Val	6,98	7,08	550	261,7	3,7	1,131	47,38	89,2
Fuente Escuarbe	11,1	7,93	653	268,7	2,11	1,39	14,7	95
Fuente del Plano	7,7	8,22	702	270,8	2,34	1,05	33,35	65,09
Fuenmayor	12	7,3	456	278,4	1,43	0,966	28	100,1
Fuente de Dos Caños	14,4	7,29	998	276,2	89,13	2,86	45,2	44
Manantial de Arguis	9,3	8,25	433	291,3	1,21	0,88	28,3	49,42
Pantano de Arguis	6	8,2	452	289,1	10,27	2,68	7,71	72,11
Fuente la Ralleta	12,7	7,51	687	202,1	39,2	2,43	2,99	96,68
Cantera de Nuevo	12,1	7,29	593	220,6	8,23	1,48	15,14	96,68

	Cl <sup>-</sup> (mg/l)	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/l)	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	SiO <sub>2</sub> (mg/l)	Dureza	O disuelto %
Fuendebién	10,5	40,23	3,8	233,18	2,61	386	70,90%
Val	9,1	0,78	3,2	382,85	2,49	418	49,60%
Fuente Escuarbe	21	1,81	14,2	151,84	4,95	298	87,80%
Fuente del Plano	26,6	9,81	16,2	156,18	2,42	300	87,90%
Fuenmayor	9,1	2,83	4,4	212,57	1,38	246	69,50%
Fuente de Dos Caños	115,5	8,51	4,7	241,86	0,89	296	79,40%
Manantial de Arguis	10,5	2,74	3	233,18	0,92	240	76,30%
Pantano de Arguis	18,9	22,62	2,9	147,5	1,33	212	88,00%
Fuente la Ralleta	62,3	24,48	4,1	178,95	0,89	254	72,90%
Cantera de Nuevo	23,1	15,67	3,7	241,86	1,35	304	90,30%

Las aguas subterráneas tienen una temperatura próxima a la media local, lo que sugiere cortos tiempos de residencia y flujos poco profundos en los acuíferos. Dominan los bicarbonatos y el calcio. Sodio y cloruros presentan baja concentración, excepto en la fuente de Dos Caños, en San Julián de Banzo, que tiene el valor más alto de CE. Se admite que descarga un acuífero relacionado con la facies Keuper (CUCHÍ y cols., 2014). Los nitratos son bajos,



**Fig. 3.** Diagramas de Stiff de las aguas muestreadas.



**Fig. 4.** Diagrama de Piper de aguas de las zonas altas de los ríos Isuela y Flumen.

dado que la mayor parte de la zona estudiada está en un área natural, prácticamente sin urbanización. Los valores más altos, Escuarbe y del Plano, corresponden a manantiales situados en la periferia del cultivo de cereal de secano.

Los diagramas de Stiff (fig. 3) indican una cierta similitud en la química de las aguas, excepto en Dos Caños. A su vez, el diagrama de Piper (fig. 4) muestra que la mayoría de las aguas son bicarbonatado-cálcicas. La excepción es, otra vez, Dos Caños (6), que es de tipo bicarbonatado-cálcico-magnésica. Los valores altos de ion magnesio sugieren que puede haber calizas tipo magnesianas y, tal vez, dolomita.

Aplicando el programa de especiación Aquachem se ha calculado el índice de saturación de diversos minerales que se presenta en la tabla VI. Varias de las aguas presentan una saturación o sobresaturación con índices

positivos de índice de saturación en minerales carbonatados, como calcita y aragonito, pero también en dolomita e incluso en magnesita. Alguna también presenta saturación en cuarzo.

### *Interacción agua de lluvia – roca: contacto directo*

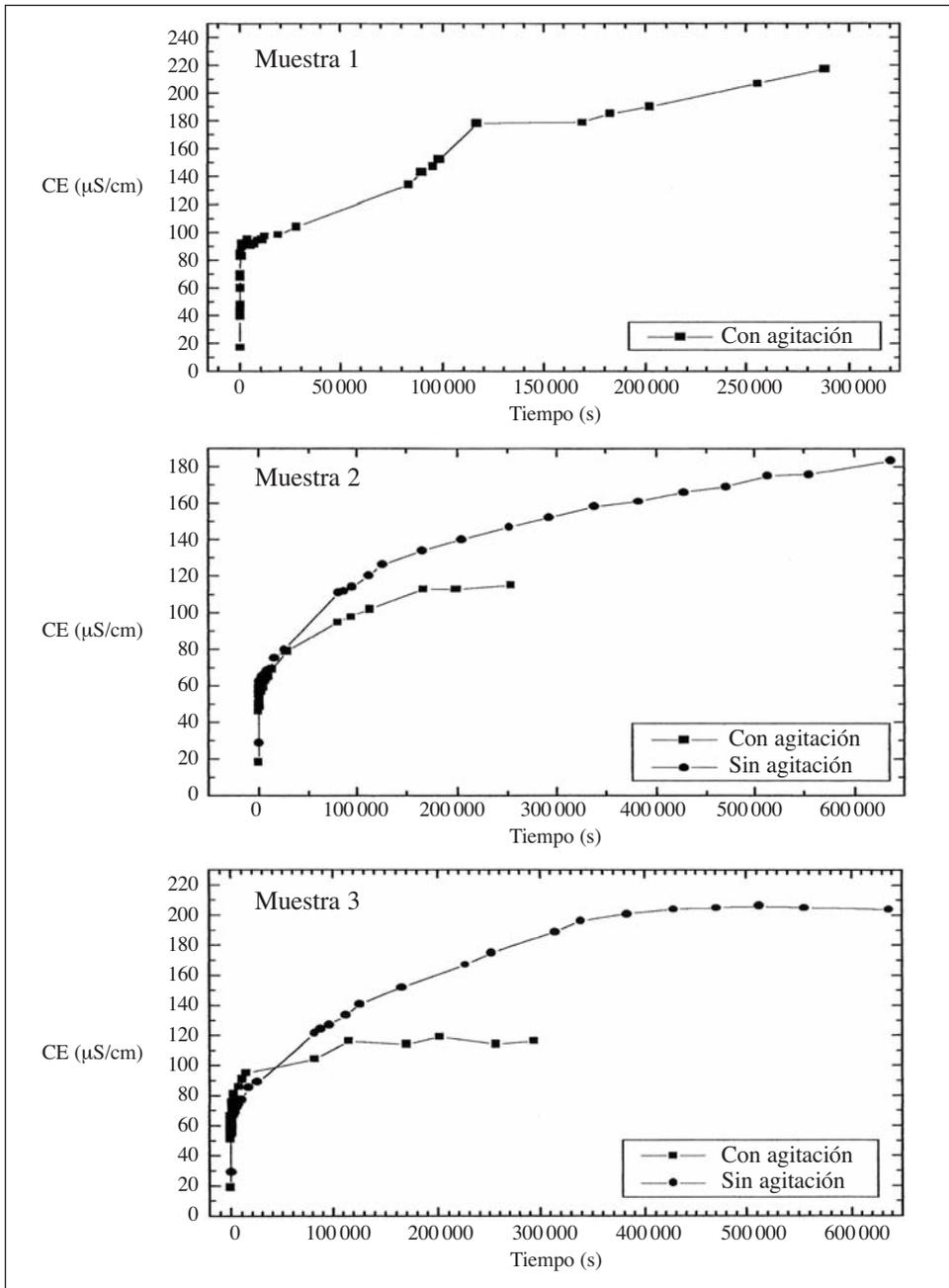
Los resultados del contacto directo con y sin agitación se presentan en forma gráfica en las figuras 5.1 a 5.5. Se observa que el tiempo de contacto sin agitación es mayor que el tiempo con ella por la fuerte abrasión de la capa de teflón de los imanes. Se finalizaba cada experimento de este tipo cuando se observaba que el núcleo de hierro quedaba al descubierto. En general, como era de esperar, a igualdad de tiempo y para una misma roca, la disolución es más rápida con agitación. Una interesante excepción son las muestras estalagmíticas (2 y 3) de la cueva de Esteban Felipe, efecto de difícil explicación por ahora. La marga del Eoceno medio de la cuenca de Arguis (muestra 11) presenta un comportamiento indiferente. En la mayoría de las muestras, hay un efecto de solapamiento entre ambos métodos, del orden de 3 horas y 80 microSiemens/cm. Pasado este tiempo, el incremento de conductividad se modera y, aunque creciente, apunta hacia valores de CE compatibles con los valores de las aguas naturales de la tabla v. La excepción es la caliza 13, de color gris y rica en numulites, que aparece en el cortado de la carretera entre la cueva de Sanclemente y la presa de Arguis. En esta roca, las conductividades obtenidas son elevadas. Este hecho puede ser de tipo natural o ser resultado de una contaminación por los solutos de los fundentes utilizados en el mantenimiento de carreteras para evitar la formación de placas de hielo en este tramo.

### *Interacción agua de lluvia – roca: percolación*

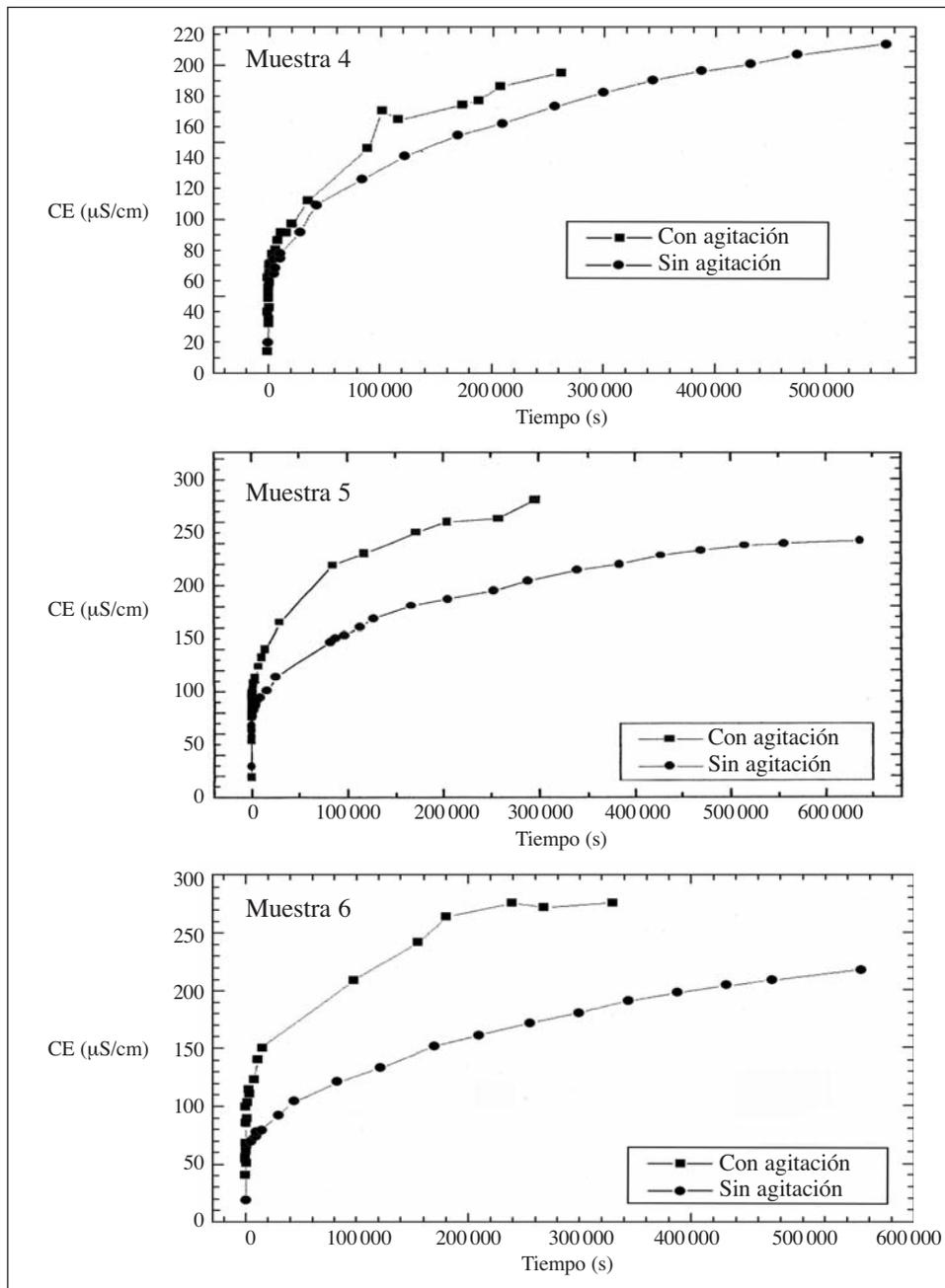
Los experimentos por percolación a través de 0,6 metros de roca molida se muestran en las figuras 6.1 a 6.5. La conductividad se ha determinado sobre diferentes volúmenes de percolado. Los experimentos muestran que la primera fracción de agua ofrece una CE superior a la del resto del percolado y que, conforme aumenta el volumen de agua recogido, disminuye la fracción disuelta. Algunas muestras, como la 7 y la 11, tuvieron una baja conductividad hidráulica (CH). En el segundo caso, parece claro que la presencia de

**Tabla vi.** Índice de saturación de diversos minerales en las aguas muestreadas, según Aquachem.

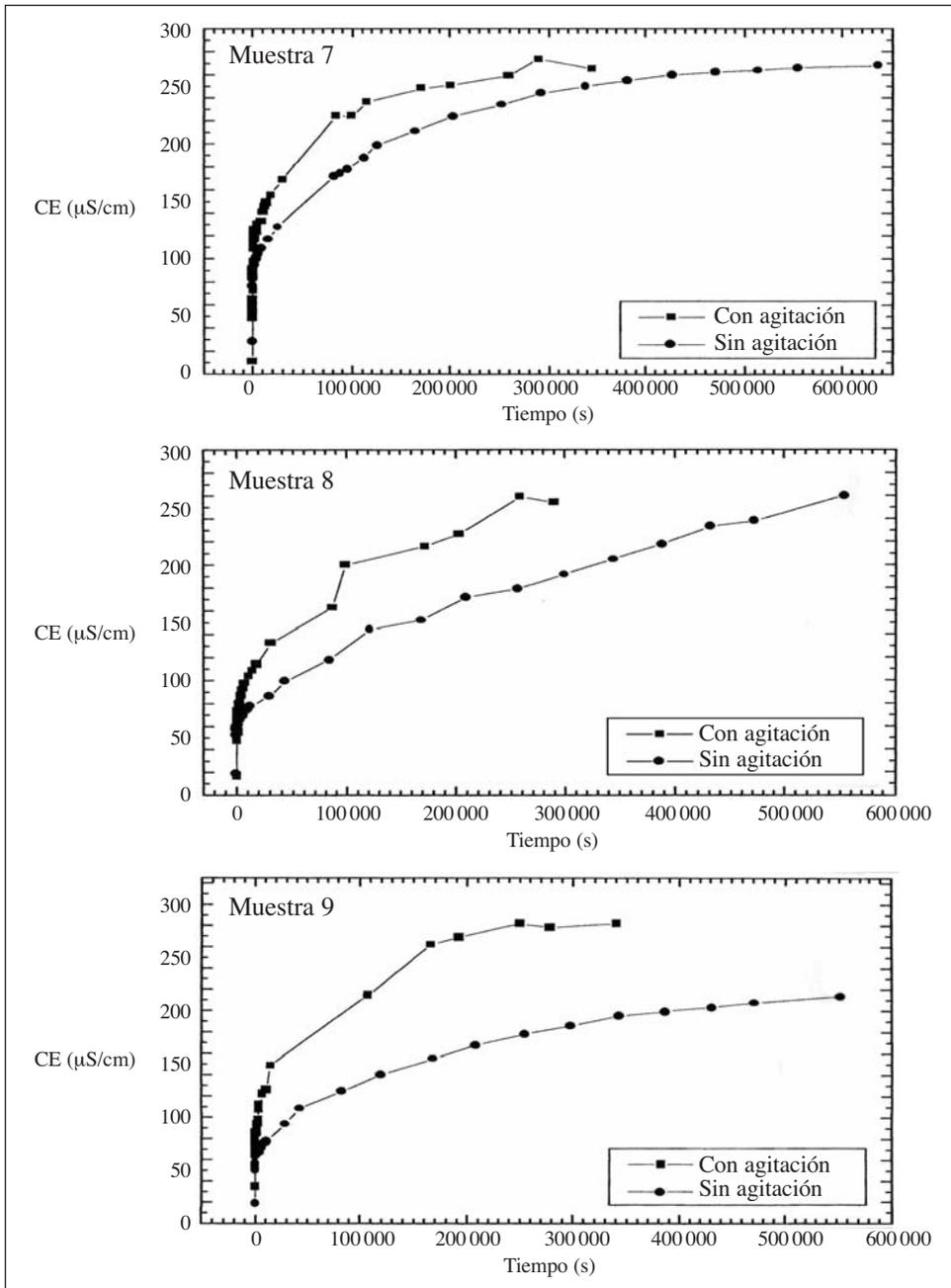
	Fuendebién	Val	Escuarbe	F. del Plano	Fuencamayor	Dos Caños	Arguis	Pantano	Ralleta	Camera
Anhidrita	-2,045	-4,031	-3,528	-2,992	-3,551	-3,202	-3,621	-2,567	-2,385	-2,595
Aragonito	-304	-307	<b>271</b>	<b>340</b>	-442	-483	<b>460</b>	<b>328</b>	-055	-154
Artinita	-7,696	-8,198	-5,551	-5,339	-7,709	-7,705	-5,147	-5,475	-6,603	-7,188
Brucita	-7,184	-6,570	-5,045	-4,372	-5,955	-5,631	-4,256	-5,168	-6,473	-6,254
Calcita	-1,152	-1,149	<b>425</b>	<b>497</b>	-289	-331	<b>616</b>	<b>487</b>	<b>098</b>	-001
Calcedonia	-702	-643	-397	-666	-961	-1,181	-1,107	-904	-1,161	-972
Crisotilo	-11,968	-9,738	-4,839	-3,209	-8,736	-8,303	-3,815	-6,000	-10,718	-9,658
Clinoestatita	-5,914	-5,220	-3,462	-3,046	-4,939	-4,842	-3,377	-4,075	-5,658	-5,249
Gel sílice	-1,499	-1,425	-1,188	-1,449	-1,755	-1,980	-1,894	-1,683	-1,956	-1,765
Dipsido	-7,966	-7,542	-3,575	-3,193	-7,086	-7,226	-3,937	-4,534	-7,304	-7,176
Dolomita	-1,493	-507	<b>182</b>	<b>784</b>	-692	-450	<b>1,100</b>	<b>049</b>	-1,141	-646
Forsterita	-13,346	-12,084	-8,772	-7,707	-11,153	-10,714	-7,911	-9,546	-12,385	-11,761
Yeso	-1,691	-3,589	-3,141	-2,558	-3,177	-2,860	-3,210	-2,107	-2,021	-2,222
Halita	-9,166	-9,017	-8,892	-8,737	-9,423	-6,550	-9,426	-8,231	-7,159	-8,267
Huntita	-8,012	-5,063	-4,143	-2,483	-5,337	-4,524	-1,772	-4,664	-7,457	-5,775
Hidromagnesita	-20,468	-15,820	-13,901	-11,052	-15,465	-14,040	-10,174	-14,712	-19,337	-16,735
Magadita	-13,604	-13,875	-10,856	-12,873	-15,515	-16,393	-15,863	-14,300	-16,243	-15,409
Magnesita	-1,671	-655	-561	-013	-726	-453	<b>175</b>	-727	-1,565	-969
Mirabilita	-10,068	-11,053	-11,331	-10,320	-11,491	-7,607	-11,504	-8,548	-7,748	-9,275
Nacrolita	-5,852	-5,378	-6,054	-5,968	-6,074	-4,268	-6,091	-5,322	-4,728	-5,269
Nastrón	-12,239	-11,340	-11,481	-10,992	-12,317	-8,785	-11,401	-9,686	-9,341	-10,768
Nesqueonita	-4,689	-3,667	-3,577	-3,025	-3,742	-3,472	-2,838	-3,737	-4,582	-3,985
Cuarzo	-173	-087	<b>143</b>	-112	-426	-655	-560	-342	-628	-437
Sepiolita	-9,441	-7,849	-4,177	-3,534	-7,716	-7,796	-4,675	-5,789	-9,370	-8,348
Vidrio de sílice	-1,214	-1,158	-909	-1,180	-1,473	-1,691	-1,620	-1,419	-1,672	-1,484
Talco	-9,686	-7,197	-1,894	-725	-6,939	-6,997	-2,249	-3,952	-9,335	-7,884
Thenardita	-11,577	-12,896	-12,965	-12,136	-13,078	-9,068	-13,235	-10,458	-9,298	-10,857
Termonatrita	-14,220	-13,639	-13,581	-13,265	-14,372	-10,721	-13,592	-12,047	-11,361	-12,818
Tremolita	-19,962	-16,575	-3,368	-1,407	-15,443	-15,801	-4,433	-7,304	-18,280	-16,567
Tirona	-20,256	-19,525	-19,941	-19,715	-20,707	-15,129	-20,082	-17,940	-16,313	-18,342
Sepiolita	-13,110	-11,972	-8,016	-7,620	-11,491	-11,401	-8,644	-10,001	-13,095	-12,116



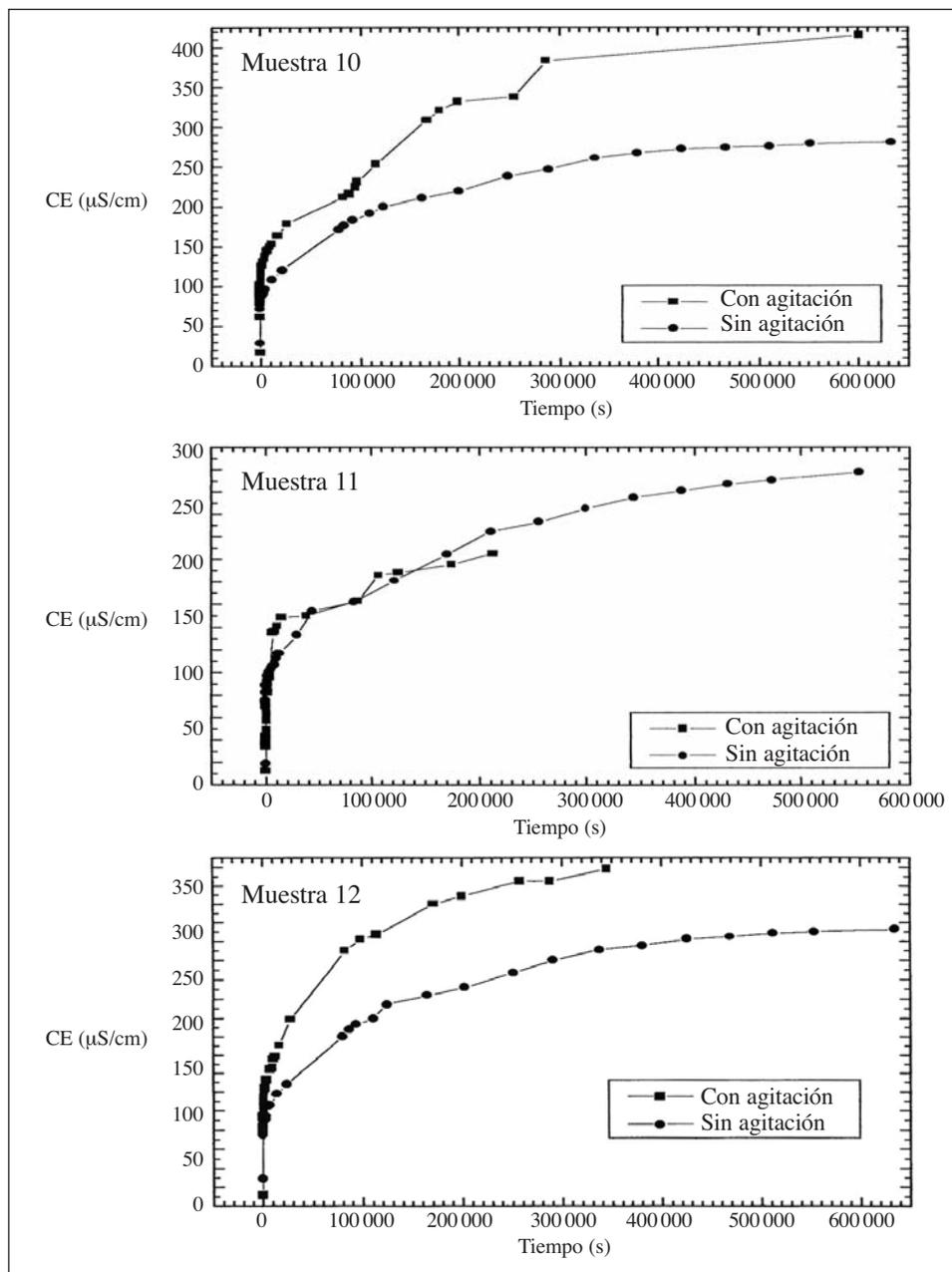
**Fig. 5.1.** Resultados por muestras del contacto agua – roca molida, con y sin agitación. Muestras 1 a 3. Espeleotemas de la cueva de Esteban Felipe (Belsué).



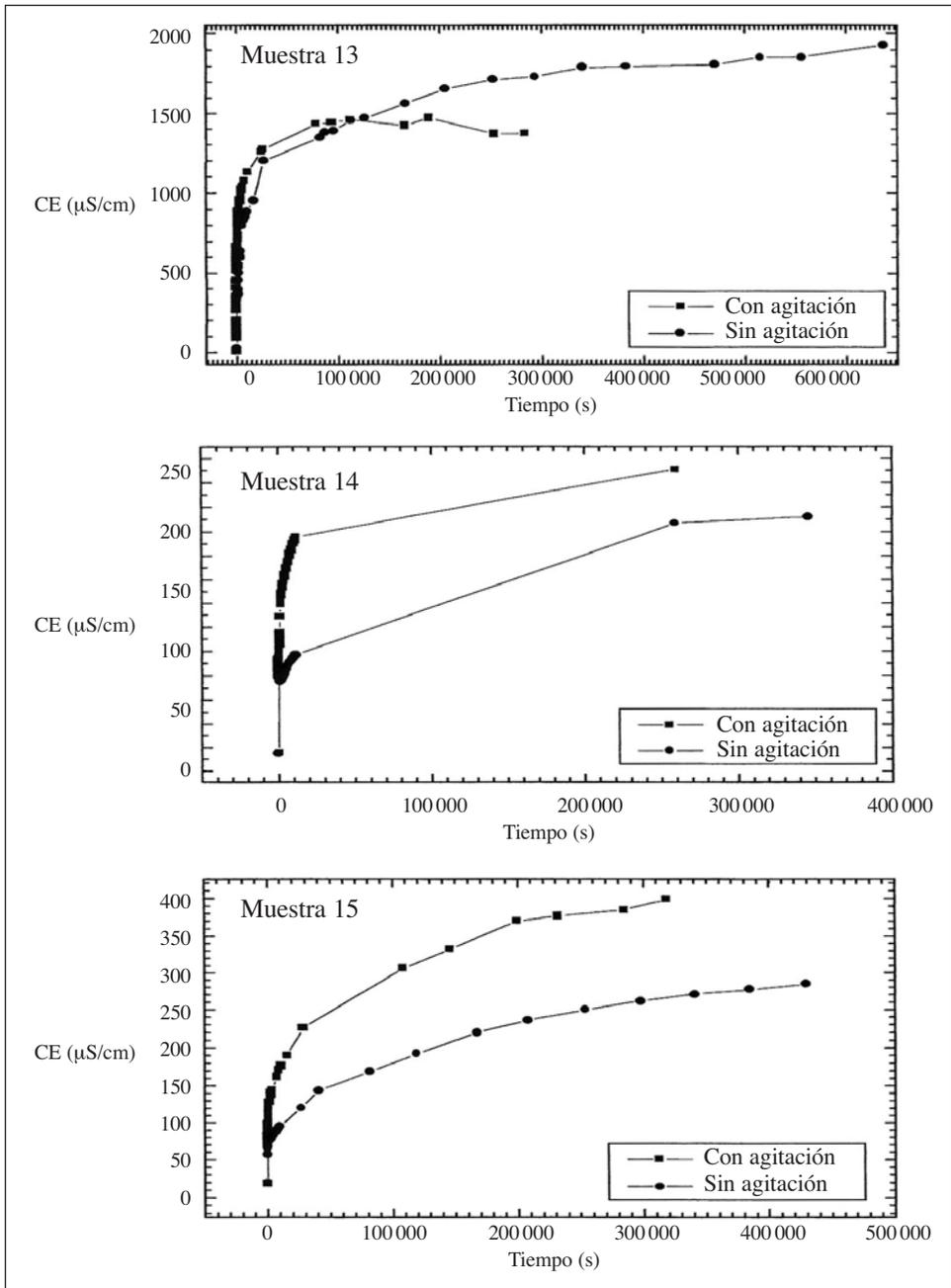
**Fig. 5.2.** Resultados del contacto agua – roca molida, con y sin agitación. Muestras 4 a 6. Calizas del Eoceno de la cueva de Esteban Felipe (Belsué).



**Fig. 5.3.** Resultados del contacto agua – roca molida, con y sin agitación. Muestras 7 a 9. Rocas del entorno de San Julián de Banzo. Dos calizas y una arenisca (8).



**Fig. 5.4.** Resultados del contacto agua – roca, con y sin agitación. Muestras 10, caliza de la Pirotecnia (San Julián de Banzo); 11, marga de Arguis; 12, caliza de Arguis en la boca de la cueva de San Clemente.

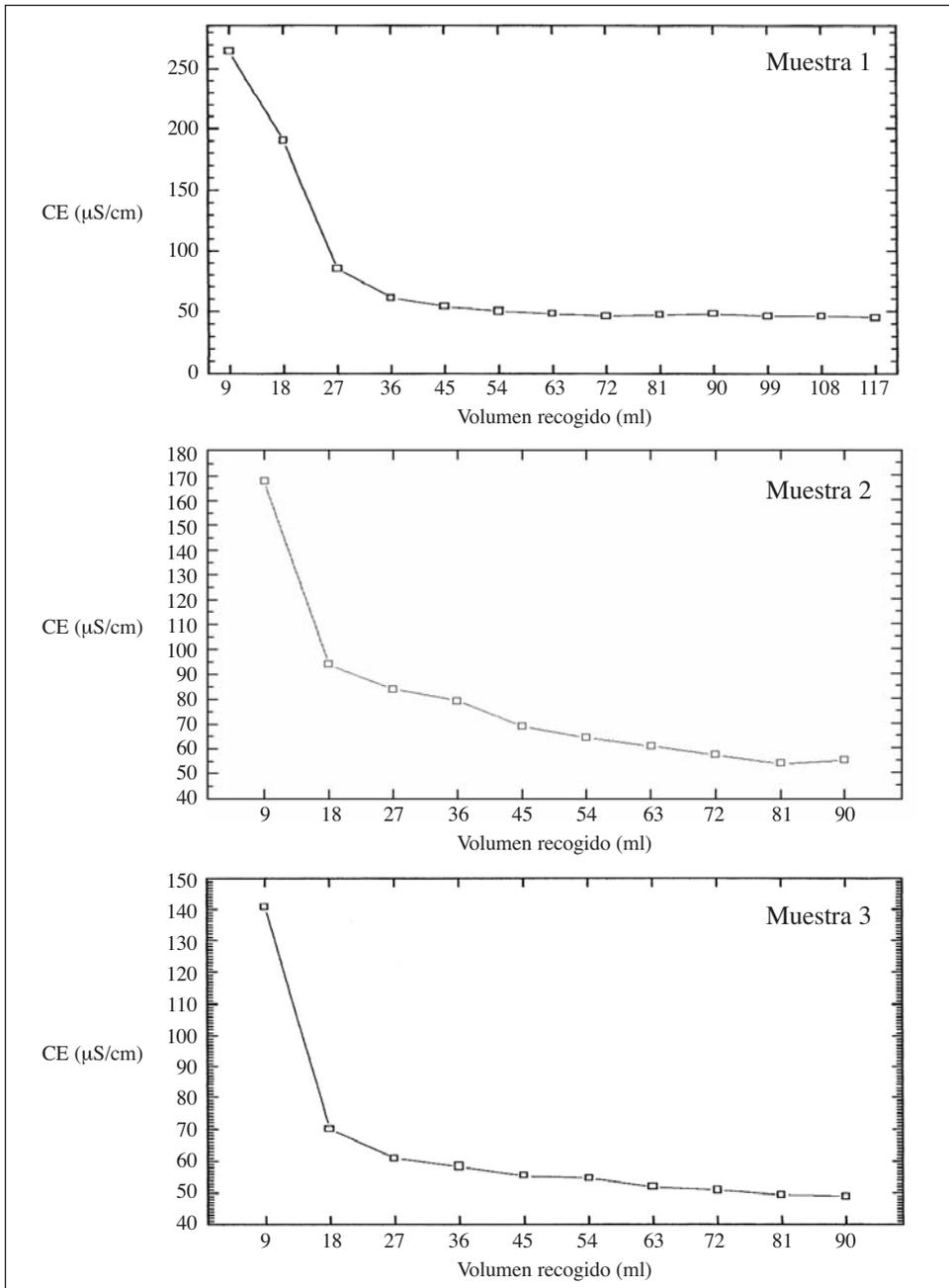


**Fig. 5.5.** Resultados del contacto agua – roca molida, con y sin agitación. Muestras 13, marga de Arguis; 14 y 15, calizas del Muschelkalk en las cercanías de Nuño.

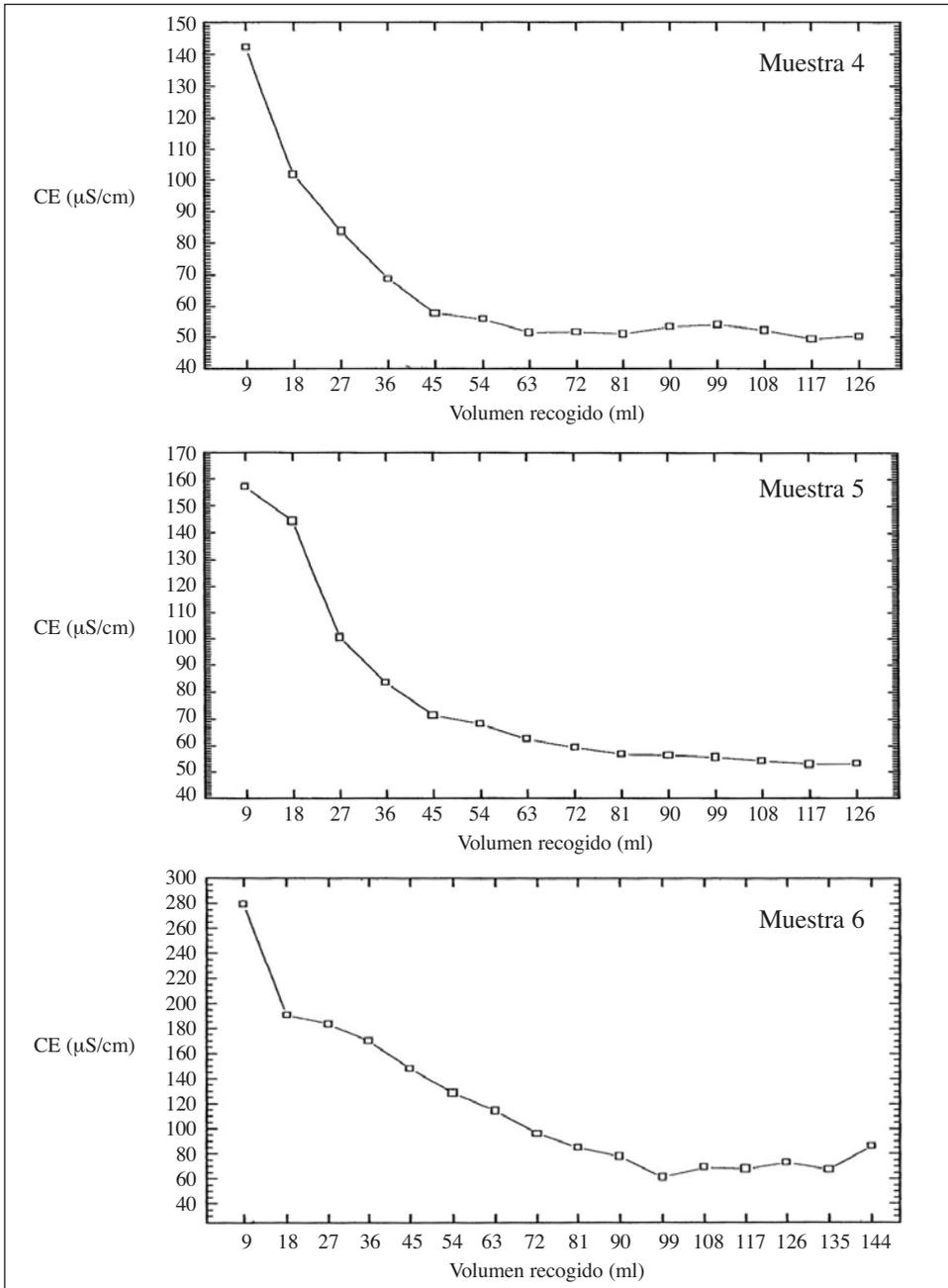
fracción fina en la marga limita la percolación, pero en el primer caso no hay todavía una razón adecuada. Los resultados sugieren que la CH disminuye al aumentar la fracción no carbonatada de las muestras. En algunos experimentos se sugiere la presencia de un valor asintótico, que en bastantes muestras está cerca de los 100 microSiemens/cm, pero hay diversas excepciones. El elevado pico inicial presenta cierto interés. Pudiera explicarse por efecto de la molienda de la roca que produjera material fino con mayor solubilidad que la fracción más gruesa debida a la mayor superficie reactiva a igualdad de masa. Este efecto es limitado y decae con cierta rapidez. El valor inicial del pico es heterogéneo. Se intuye alguna relación con las características petrológicas de la roca y es, una vez más, tema que necesitaría mayor estudio.

El valor más alto corresponde a la ya mencionada muestra 13, que también mostraba una alta CH. En esta, el valor inicial destaca del resto y mantiene CE elevadas durante el resto del experimento. La tendencia asintótica a elevados valores de percolado sugiere que se trata de una aportación natural de sales, al margen de la hipotética contaminación por fundentes de origen antropológico. Quizás la posición estratigráfica de estos materiales bajo las margas de Arguis pudiera explicar este comportamiento. En la misma muestra 13, se realizó un experimento de secado a 50 °C. Se intentaba representar el comportamiento de un suelo ante dos chaparrones separados en el tiempo. La figura 6.5 (arriba) muestra un repunte apreciable de CE al volver a reanudarse la percolación. Sugiere que el proceso de secado produce una acumulación de solutos en forma sólida, fácilmente lixiviales en el frente de una nueva humectación. Pero se observa que tras una fase de meseta se pasa a un segundo descenso, muy acusado, para el que no se tiene explicación en estos momentos. Un último experimento se realizó con la caliza número 13, modificando el espesor de la roca molida percolada.

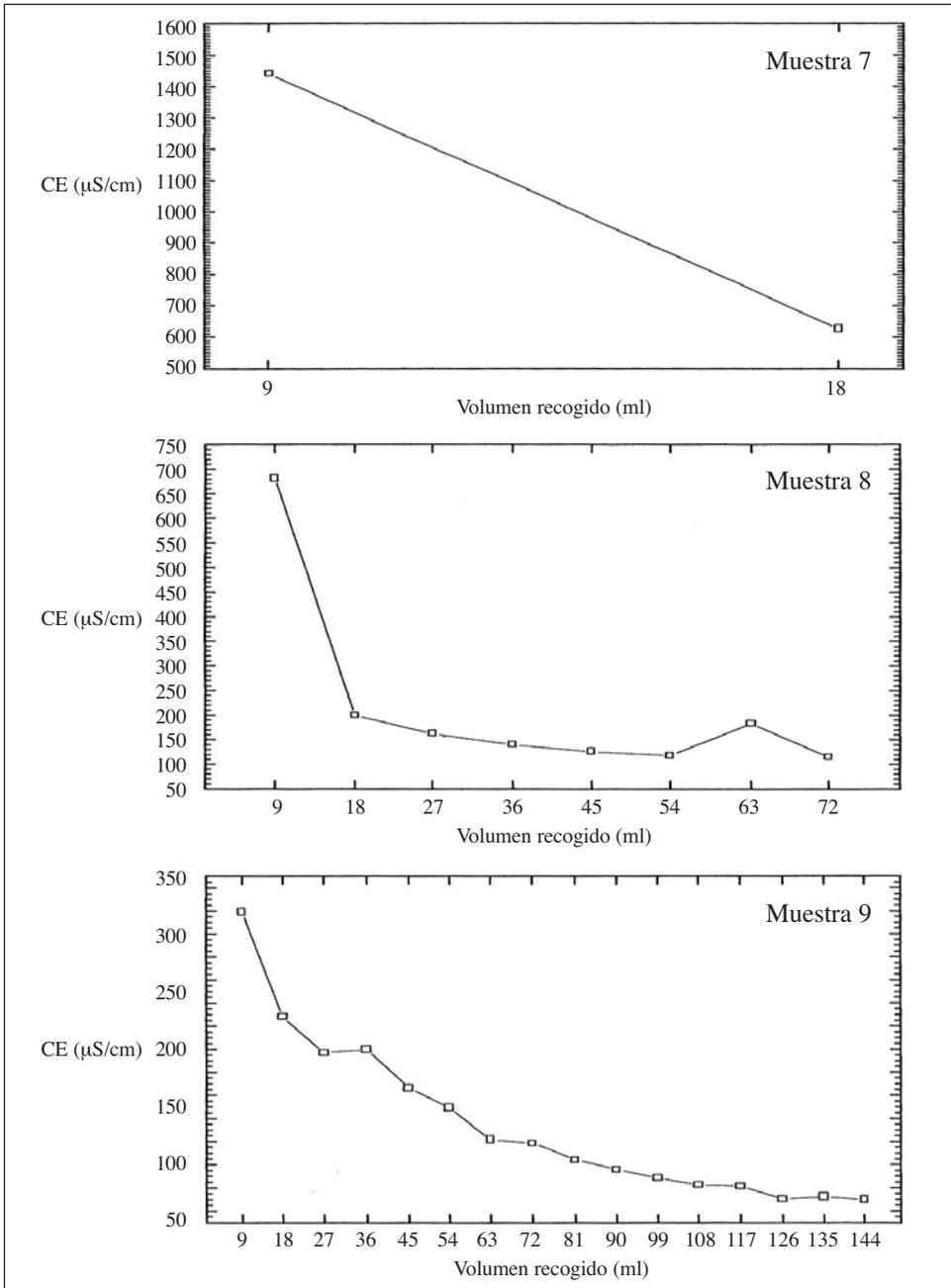
Los resultados (fig. 7) presentan el mismo esquema que en el conjunto de experimentos anteriores, es decir, que la primera fracción es más concentrada que el resto. Además, los valores iniciales son similares al experimento previo con este mismo material. Como es de esperar, a igualdad de volumen percolado, a mayor longitud de columna corresponde una mayor CE. Sin embargo, los valores finales son menores a menor longitud de columna y menor masa lixiviada, lo que sugiere una limitación en el



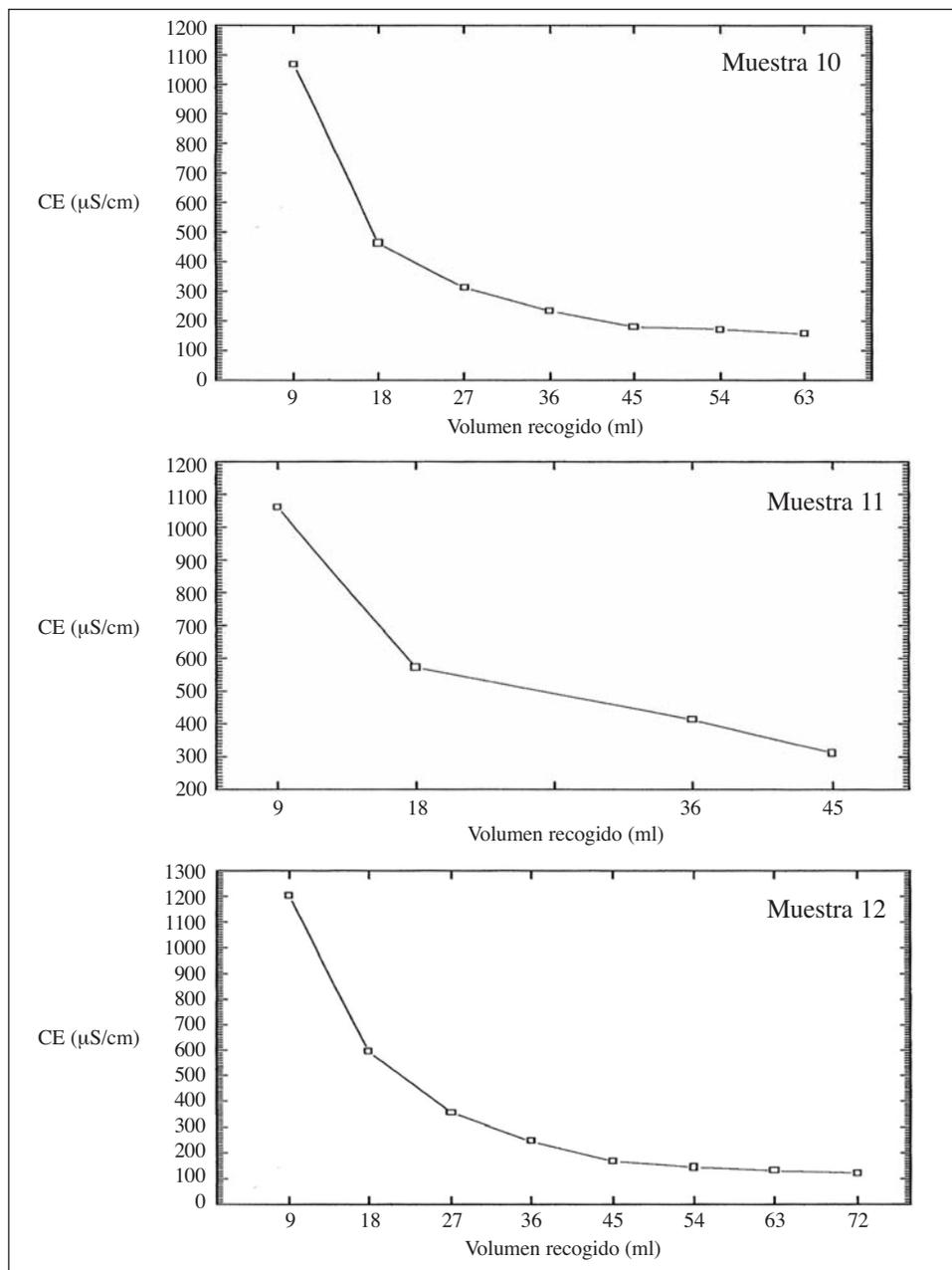
**Fig. 6.1.** Resultados de percolación de agua de lluvia a través de roca molida. Muestras 1 a 3. Espeleotemas de la cueva de Esteban Felipe (Belsué).



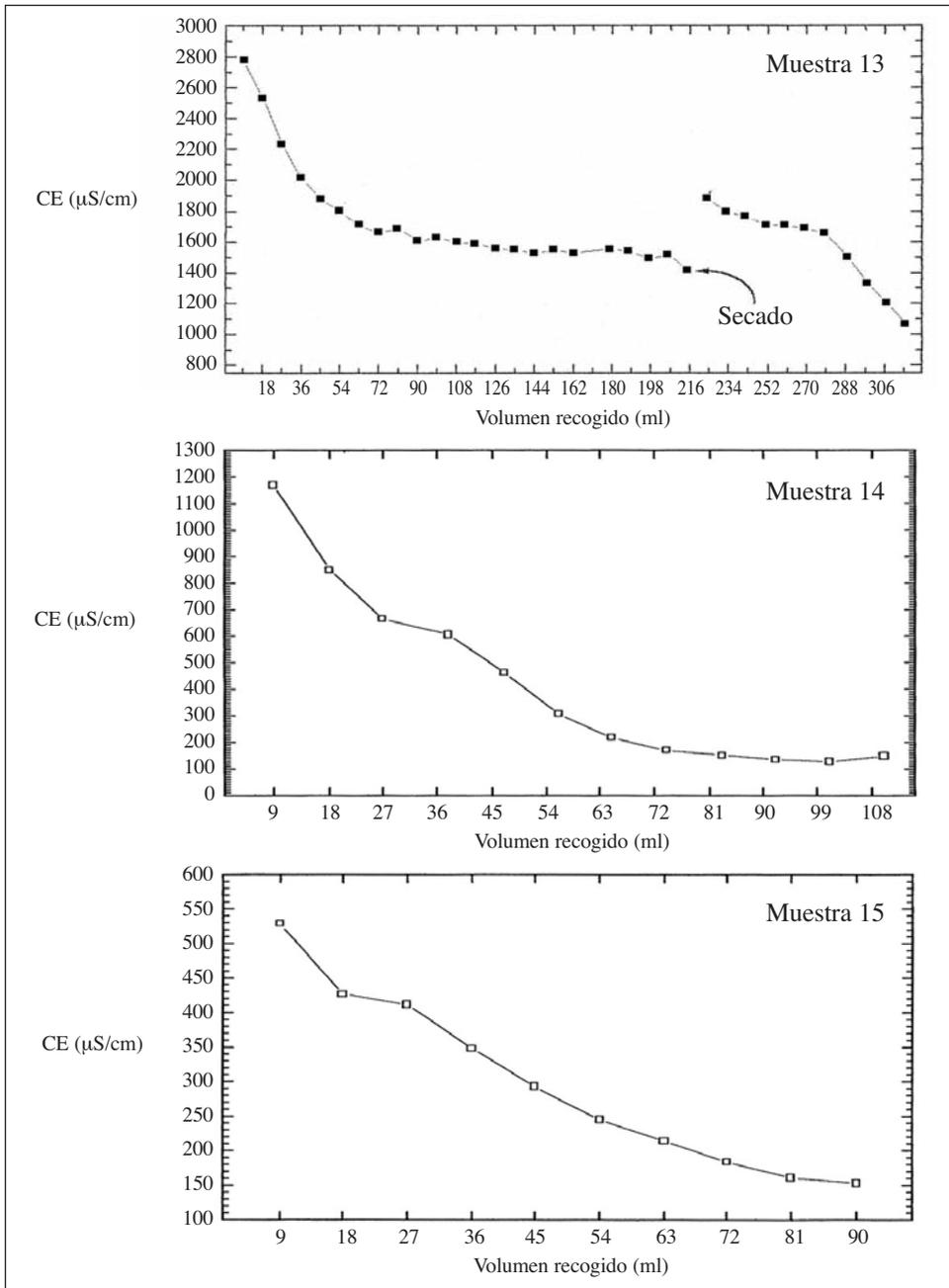
**Fig. 6.2.** Resultados de percolación de agua de lluvia a través de roca molida. Muestras 4 a 6. Calizas del Eoceno de la cueva de Esteban Felipe (Belsué).



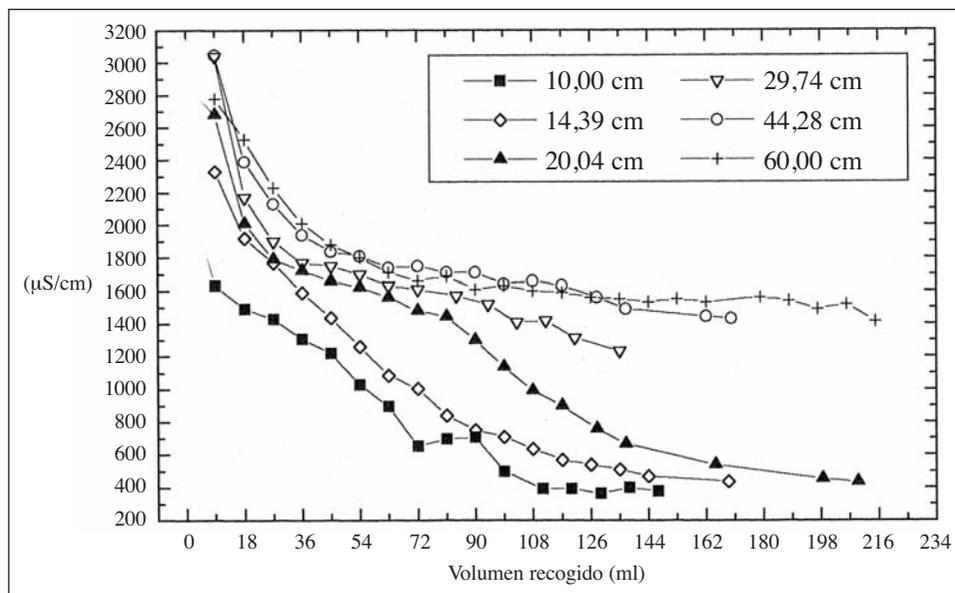
**Fig. 6.3.** Resultados de percolación de agua de lluvia a través de roca molida. Muestras 7 a 9. Rocas del entorno de San Julián de Banzo. Dos calizas y una arenisca (8).



**Fig. 6.4.** Resultados de percolación de agua de lluvia a través de roca molida. Muestras 10, caliza de la Pirotecnia (San Julián de Banzo); 11, margas de Arguis; 12, caliza de Arguis en la boca de la cueva de San Clemente.



**Fig. 6.5.** Resultados de percolación de agua de lluvia a través de roca molida. Muestras 13, marga de Arguis; 14 y 15, calizas del Muschelkalk en las cercanías de Nuño.



**Fig. 7.** Resultados de percolación de agua de lluvia a través de espesores diferentes de roca molida. Muestra 13. Caliza a techo del Eoceno calizo, entre la boca de la cueva de Sanclemente y la presa de Arguis.

contenido de solutos. Los valores finales de las columnas más cortas se acercan a las de las restantes rocas carbonatadas.

## CONCLUSIONES

El artículo ofrece un conjunto de datos sobre aguas y rocas de una zona del Prepirineo del Alto Aragón. Son básicos sobre el pH y contenido en carbonato cálcico de las rocas de esa zona, así como nuevos datos sobre la química de la lluvia y las aguas de diversos manantiales de esa área. Los resultados indican que el agua de los manantiales kársticos es el resultado de la interacción entre el agua de lluvia y las rocas locales. Y, por otro lado, se pone en evidencia la existencia de una ya sospechada heterogeneidad en las rocas y aguas de la zona.

La información que aquí se ofrece es susceptible de servir de base para futuros estudios.

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos las observaciones del doctor David Badía sobre el pH de los suelos calcáreos y el denominado *pH de abrasión*. Asimismo, la ayuda de Joaquín Lanuza, Ángel Jiménez y Gonzalo Gonzalo en la realización de los experimentos.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BUERA, J., J. A. CUCHÍ y J. A. MANSO (1997). Hidroquímica de las aguas naturales de los sectores occidental y central de la sierra de Guara (Huesca). *Lucas Mallada*, 9: 35-63.
- CARDELL-FERNÁNDEZ, C., G. VLEUGELS, K. TORFS y R. VAN GRIEKEN (2002). The processes dominating Ca dissolution of limestone when exposed to ambient atmospheric conditions as determined by comparing dissolution models. *Environmental Geology*, 43: 160-171.
- CONDE, P., J. A. MARTÍN y R. JIMÉNEZ (2007). Chemical vulnerability of red soils in La Mancha (Central Spain). *Science of the Total Environment*, 378: 228-232.
- CONDE, P., J. A. MARTÍN, R. GARCÍA-GIMÉNEZ y R. JIMÉNEZ (2009). Determination of the neutralization capacity of soils using abrasión pHs. Base cations concentrations and mineralogy in Castilla-La Mancha (Spain). *Fresenius Environmental Bulletin*, 18 (3): 280-293.
- CUCHÍ, J. A., J. A. MANSO, M. SUBÍAS y J. BUERA (1999). Hidroquímica de la sierra de Guara. En B. Andreo, F. Carrasco y J. J. Durán (eds.), *Contribución del estudio científico de las cavidades kársticas al conocimiento geológico*: 497-506. Patronato de la Cueva de Nerja. Nerja (Málaga).
- CUCHÍ, J. A., J. L. VILLARROEL y J. A. MANSO (2002). Características del manantial de Fuenmayor (San Julián de Banzo, Huesca). *Geogaceta*, 31: 75-78.
- CUCHÍ, J. A., D. CHINARRO y J. L. VILLARROEL (2014). Linear system techniques applied to the Fuenmayor karst spring, Huesca (Spain). *Environmental Earth Sciences*, 79: 1041-1060. DOI 10.1007/s12665-013-2509-6.
- DEL VALLE, J. (1997). *El clima del Prepirineo central y occidental aragonés y sus somontanos*. Consejo de Protección de la Naturaleza de Aragón. Zaragoza. 327 pp.
- ETTAZARINI, S. (2005). Processes of water – rock interaction in the Turonian aquifer of Oum Er-Rabia Basin, Morocco. *Environmental Geology*, 49: 293-299.
- FIGUEIREDO, C. A., J. M. MARQUÉS, A. M. MAURICIO y L. AIRES-BARROS (2000). Water – rock interactions and monuments stone decay: the case of Basilica da Estrela, Portugal. En *Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Congress on Deterioration and Conservation of Stone*, vol. 1: 79-87. Elsevier. Ámsterdam.

- LIU, Z., C. GROVES, D. YUAN, J. MEIMAN, G. JIANG, S. HE y Q. LI (2004). Hydrochemical variations during flood pulses in the south-west China peak cluster karst: impacts of  $\text{CaCO}_3 - \text{H}_2\text{O} - \text{CO}_2$  interactions. *Hydrological Processes*, 18. DOI: 10.1002/hyp.1472.
- MILLÁN, H. (2006). *Estructura y cinemática del frente de cabalgamiento surpirenaico en las Sierras Exteriores aragonesas*. IEA (Colección de Estudios Altoaragoneses, 53). Huesca. 396 pp.
- MONTES, M. J. (2009). *Estratigrafía del Eoceno-Oligoceno de la cuenca de Jaca (sinclinatorio del Guarga)*. IEA (Colección de Estudios Altoaragoneses, 59). Huesca. 355 pp.
- MONTSERRAT, J. M.<sup>a</sup> (1986). *Flora y vegetación de la sierra de Guara (Prepirineo aragonés)*. DGA (Naturaleza en Aragón, 1). Zaragoza. 334 pp.
- NADLER, A., M. MAGARITZ, F. MAZOR y U. KAFRI (1980). Kinetics of chemical processes in a carbonate aquifer: A case study of water – rock interaction in the aquifer of western and central Galilee (Israel). *Journal of hydrology*, 45 (1): 39-56.
- OATES, J. A. H. (1998). *Lime and limestone: Chemistry and Technology, Production and Uses*. John Wiley-VCH Verlag GmbH. Weinheim; Nueva York. 455 pp.
- OLIVÁN, C. (2013). *Delimitación, evaluación de la recarga y funcionamiento hidrodinámico del acuífero drenado por el manantial kárstico de Fuenmayor (Prepirineo aragonés)*. Tesis doctoral. Universidad de Zaragoza. Zaragoza. 196 pp.
- PUYAL, M. Á., J. A. CUCHÍ y J. A. MANSO (1998). Hidroquímica de aguas naturales del Pirineo aragonés. *Lucas Mallada*, 10: 173-188.
- RODRÍGUEZ, J. (1986). *Geomorfología de las Sierras Exteriores oscenses y su piedemonte*. IEA (Colección de Estudios Altoaragoneses, 4). Huesca. 172 pp.
- SALAMERO, E. (2002). *Sierras de piedra y agua*. Camping Mascún. Huesca. 331 pp.
- STEVENS, R. N., y M. K. CARRON (1948). Simple field test for distinguishing minerals by abrasion pH. *American Mineralogist*, 33: 31-49.
- VILLARROEL, J. L., J. A. CUCHÍ y J. A. MANSO (2002). Características del manantial de Fuenmayor (San Julián de Banzo, Huesca). *Geogaceta*, 31: 75-78.
- VILLARROEL, J. L., y J. A. CUCHÍ (2002). Análisis de respuesta de Fuenmayor (San Julián de Banzo, Huesca). Primeros resultados. *Geogaceta*, 31: 121-124.
- VILLARROEL, J. L., y J. A. CUCHÍ (2004). Estudio cualitativo de la respuesta, de mayo de 2002 a abril de 2003, del manantial kárstico de Fuenmayor (San Julián de Banzo, Huesca) a la lluvia y la temperatura atmosférica. *Boletín Geológico y Minero*, 115 (2): 237-246.