

Lucas Mallada, **18**: 147 a 177
ISSN: 0214-8315, e-ISSN: 2445-060X
<http://revistas.ica.es/index.php/LUMALL>
Huesca, 2016

INTERACCIÓN AGUA DE LLUVIA – ROCA EN CALIZAS DEL VALLE DEL ALTO ISUELA (HUESCA)

Rodrigo ELPUENTE¹
José Antonio CUCHÍ²
José Luis VILLARROEL²
José Antonio MANSO³

RESUMEN.— Se analizan algunas características químicas de rocas de la cuenca del Isuela y de su lixiviado con agua de lluvia.

ABSTRACT.— Some chemical characteristics of Isuela basin rocks and their leachates with rainwater are presented.

KEY WORDS.— Prepirineo, limestone, marl, Huesca (Spain).

INTRODUCCIÓN

La interacción entre agua de lluvia y rocas calcáreas es un tema de interés por sus implicaciones en la formación de suelos, calidad de las aguas superficiales y subterráneas (NADLER y cols., 1980; LIU y cols., 2004), y

Recepción del original: 12-12-2016

¹ C/ Doña Sancha, 2, 2.º F. E-22005 HUESCA. rojoelo@hotmail.com

² 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

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

alteración de rocas y monumentos (FIGUEIREDO y cols., 2000; CARDELL-FERNÁNDEZ y cols., 2002).

Una parte importante del Prepirineo del Alto Aragón está formado por rocas carbonatadas, en las que abundan los rasgos kársticos formados por infiltración del agua de lluvia a través de las rocas, que genera aguas subterráneas. Sin embargo, hay poca información sobre las características químicas de las calizas y otras rocas carbonatadas del Prepirineo, así como sobre la interacción entre estas y el agua, con la excepción de los trabajos previos de BUERA y cols. (1997), MONAJ (2003) y MONAJ y cols. (2014). Los resultados de estos últimos trabajos sorprendieron por la presencia de altos valores de pH y conductividad eléctrica (CE) en lixiviados de las rocas.

Con el fin de completar la información obtenida, se ha estudiado la interacción por percolación de agua de lluvia con muestras de rocas de la cuenca del Isuela molidas a diversas texturas y con periodos de contacto diferentes. El objetivo es intentar reproducir en laboratorio el proceso natural de flujo de agua a través del suelo y las rocas calcáreas.

MARCO GEOLÓGICO

La geología de la parte alta de la cuenca es variada y se puede ver en detalle en MILLÁN (2006) y MONTES (2009). El río fluye de norte a sur. La cabecera de la cuenca se encuentra en la sierra de Bonés en areniscas de la formación Campodarbe. La cubeta de Arguis está abierta en materiales margosos de las formaciones Belsué-Atarés y Arguis, del Eoceno medio y superior. La barrera caliza donde apoya la presa pertenece a la formación Guara, de la misma edad. Descendiendo por el cañón, pasado el viejo puente de El Escalar se accede a areniscas rojizas de la facies Garum y después a calizas del Cretácico superior. Desde la vertical de Ordás se pasa a calizas tableadas del Muschelkalk hasta el azud de Nueno. A partir de aquí se llega a los materiales arenoarcillosos del Mioceno de la hoya de Huesca, localmente recubiertos por gravas que presentan horizontes tipo petrocálcico (mallacán) (tabla I).

Tabla 1. Muestras, edad geológica y ubicación de las muestras estudiadas.

	Roca	Denominación	Edad geológica	Localidad	Coordenadas UTM H30		
					X	Y	Z
1	Arenisca	Bonés	Eoceno medio	Nueno	4689475	714850	1318
2	Caliza	Pico del Águila	Eoceno medio	Arguis	4689150	712950	1300
3	Marga	Mesón Nuevo	Eoceno medio	Arguis	4689450	713375	1260
4	Marga	Rasal	Eoceno medio	Arguis	4688375	710750	1080
5	Marga	La Foz	Eoceno medio	Arguis	4687500	712025	980
6	Caliza	Presa de Arguis	Eoceno medio	Arguis	4686975	712050	970
7	Caliza	Medio	Eoceno medio	Arguis	4686400	712000	960
8	Caliza	Cueva de Sanclemente	Eoceno medio	Arguis	4686525	712075	950
9	Caliza	Puente Viejo	Eoceno medio	Arguis	4686475	712125	940
10	Arenisca	Molino de Arguis	Garumniense	Arguis	4686000	712275	920
11	Caliza	Molino de Arguis II	Cretácico superior	Arguis	4685875	712350	910
12	Caliza	Cantera de Boráu	Muschelkalk	Nueno	4684800	712450	845
13	Caliza	Kilómetro 587	Muschelkalk	Nueno	4683525	712025	780
14	Mallacán	Golf	Cuaternario, glaciés	Nueno	4681450	710775	675
15	Arenisca	Sabayés	Mioceno	Nueno	4681700	712400	765
16	Arenisca	Montearagón	Mioceno	Quicena	4670508	719531	610
17	Caliza	Cueva de Esteban Felipe	Eoceno medio	Nueno	4686700	717750	1040
18	Caliza	Cueva Drólica	Eoceno medio	Sarsa de Surta	4687458	746614	1050
19	Caliza	Calatorao	Jurásico	—			
20	Caliza	Forro EPSH	¿Jurásico?	—			
21	Estalactita	Cueva de los Murciélagos	Eoceno medio	Loporzano	4679725	724850	770

MUESTREO Y MÉTODOS ANALÍTICOS

Para el presente artículo se recogieron 60 litros de agua de lluvia con ayuda de un gran embudo sujeto a un depósito cuidadosamente lavado con agua desionizada, entre los meses de septiembre y octubre de 2003 en Loporzano (Huesca). El pH del agua de lluvia se determinó, con la mayor celeridad posible tras la recogida de la precipitación, 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.

Paralelamente, a lo largo de la cuenca del Isuela se muestrearon 16 rocas carbonatadas, a las que se unieron dos muestras de calizas de la sierra de Guara, más otras dos rocas similares utilizadas en construcción y un espeleotema de la cueva de los Murciélagos en Vadiello, en la cuenca del Guatizalema. Ocho de las muestras son calizas representativas del Prepirineo, especialmente de la formación Guara del Eoceno medio, formación Bona Adraen, del Cretácico superior y del Muschelkalk. A estas hay que añadir dos calizas de construcción, las muestras 19 y 20 que se colectaron entre los materiales de obra del edificio de la Escuela Politécnica Superior de Huesca (EPSH). La roca número 19 es una caliza microcristalina, de color gris oscuro, con algunas vetas de calcita. Procede de canteras de la localidad de Calatorao donde se explota un nivel de la formación Chelva del Jurásico medio, correspondiente a los pisos Bajociense y Batoniense. En Huesca se ha utilizado para bordillos de acera y ensolado de la plaza de la Universidad y en las columnas salomónicas de la capilla de la familia Lastanosa en la seo oscense. La roca número 20 es una caliza micrítica utilizada como forro ornamental en el edificio principal de la EPSH. Probablemente es de la zona de Alicante. Se han muestreado también tres margas de la cubeta de Arguis. Las cuatro areniscas tienen origen variado dado que son de edades y lugares diversos.

Las muestras de roca se rompieron manualmente para obtener fragmentos del orden de los 10-15 cm³ que se molieron posteriormente en un molino de barras. Después se procedió al tamizado en tres fracciones con diámetro de partícula de menos de 1 milímetro, entre 1 y 2 milímetros y mayor de 2 milímetros. En las muestras tamizadas se determinó el pH en relación 1 : 2,5 (roca, agua desionizada) y agitación mediante el mismo material y procedimiento utilizado con el agua de lluvia. Para la textura fina (menos de 1 milímetro de luz) se determinó este parámetro al transcurrir 1, 2 y 5 horas, 1 y 4 días. Para el caso de la textura gruesa (entre 1 y 2 milímetros de luz) a las 2, 3 y 4,5 horas y a 1 y 2 días. Los carbonatos se determinaron con un calcímetro de Bernard.

A partir de las 21 muestras y sus correspondientes tres fracciones se prepararon rellenos de través de tubos de PVC, de 24 milímetros de diámetro y 30 centímetros de longitud (fig. 1). A través de estos se hizo percolar agua

de la lluvia recogida, mediante un sistema de goteo, ajustable a las características de conductividad hidráulica de cada columna. El volumen del lixiviado varía para cada muestra en función de la conductividad hidráulica de la muestra, a su vez función de la porosidad que depende del tamaño de la molienda. La textura más fina percolaba más despacio y, consecuentemente, el volumen recogido para la textura fina es menor a igualdad de tiempo que para las texturas media y gruesa. Cada experimento duró hasta 12 horas, finalizando bien cuando se recogían 120 cm³ o se alcanzaba el tiempo indicado. Posteriormente, se prepararon tres muestras en tubos de igual diámetro y 50 centímetros de longitud para repetir el experimento. Bajo cada tubo se colocaron preformas de PET de 12 cm³ para recoger el lixiviado.

En los lixiviados, por fracciones de 12 cm³, se determinó la conductividad eléctrica, pH, y concentraciones de iones de calcio y magnesio. La conductividad eléctrica (CE) se determinó mediante un conductímetro Orión 122 con sonda compensatoria de temperatura y electrodo calibrado para



Fig. 1. Diseño del equipo experimental.

presentar los datos en $\mu\text{S}/\text{cm}$ a $20\text{ }^\circ\text{C}$. El pH se determinó mediante el equipo y método ya descritos. Los iones de calcio y magnesio se determinaron mediante complexometrías con EDTA con indicadores tales como ácido calconcarboxílico y negro de Eriocromo T.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Agua de lluvia. Como se ha señalado, como base para el experimento se ha utilizado un agua de lluvia compuesta, captada en Loporzano durante los temporales de otoño, entre septiembre y diciembre de 2003, con CE de $28,6\ \mu\text{S}/\text{cm}$ a $20\text{ }^\circ\text{C}$ y pH de 6,49. Ambos se consideraron valores normales y coherentes con los que presenta la bibliografía para aguas naturales como, por ejemplo, BERNER y BERNER (1987) y CUCHÍ y MANSO (1997).

Contenido en carbonato cálcico de la roca. Uno de los objetivos básicos era caracterizar parcialmente las rocas de la cuenca del Isuela dada la influencia de este parámetro en su disolución.

La tabla II presenta el contenido en carbonatos expresado como carbonato cálcico de las rocas muestreadas. Este valor oscila entre el 4 y el 100%. El valor máximo corresponde a calizas de la formación Guara y a la estalactita de la muestra 21, al igual que sucedía en el trabajo de MONAJ y cols. (2014). Sorprende un poco que la caliza cercana al puente antiguo de El Escalar de Arguis, tomada en la antigua carretera y en las cercanías de una surgencia temporal, presente un bajo contenido en carbonatos. Pudiera ser un nivel dolomitizado o silicificado que necesitaría un estudio más detallado. La caliza del Cretácico y las del Muschelkalk también presentan contenidos dominantes en carbonato. Las calizas 19 y 20, sin relación con la zona, presentan características diversas. La primera, del Jurásico de Calatorao, tiene un contenido que la define como una caliza acompañada por componentes menores. La segunda presenta un bajo contenido que pudiera estar asociado con un contenido relativamente alto de dolomita ($\text{CaMg}[\text{CO}_3]_2$), que reacciona ante el ácido mucho más despacio que la caliza, aunque también pudiera deberse al alto grado de cristalinidad que confiere carácter ornamental a esta roca. El valor de la muestra de petrocálcico (mallacán) del saso de Arascués es coherente con su formación por cementación de gravas prepirenaicas con carbonato cálcico derivado de su disolución.

Las muestras de margas grises de la cubeta de Arguis presentan valores inferiores al 50%, que se encuentran dentro del rango geológico de estos materiales. El bajo valor en carbonatos apoya su fuerte erodabilidad con el efecto directo en el aterramiento del cercano embalse.

Todas las areniscas presentan valores bajos, dada la presencia de materiales terrígenos y silíceos no carbonáticos. Las areniscas del Mioceno presentan valores diferentes que pueden asociarse con la heterogeneidad de este material, muy utilizado para construcción en la hoya de Huesca, y que necesita un estudio específico. El valor mínimo corresponde a la arenisca roja del Garumniense del molino de Nueno, piedra utilizada en el pasado

Tabla II. Carbonatos, como porcentaje (%) de CO_3Ca en rocas de la cuenca del Isuela mediante calcímetro de Bernard.

<i>Muestra</i>	<i>Roca</i>	<i>Denominación</i>	<i>Edad geológica</i>	<i>% de carbonatos</i>
1	Arenisca	Bonés	Eoceno medio	44
2	Caliza	Pico del Águila	Eoceno medio	100
3	Marga	Mesón Nuevo	Eoceno medio	39
4	Marga	Rasal	Eoceno medio	38
5	Marga	La Foz	Eoceno medio	48
6	Caliza	Presa de Arguis	Eoceno medio	100
7	Caliza	Medio	Eoceno medio	100
8	Caliza	Cueva de Sanclemente	Eoceno medio	100
9	Caliza	Puente Viejo	Eoceno medio	24
10	Arenisca	Molino de Arguis	Garumniense	4
11	Caliza	Molino de Arguis II	Cretácico superior	100
12	Caliza	Cantera de Boráu	Muschelkalk	100
13	Caliza	Kilómetro 587	Muschelkalk	94
14	Mallacán	Golf	Cuaternario, glacia	80
15	Arenisca	Sabayés	Mioceno	16
16	Arenisca	Montearagón	Mioceno	33
17	Caliza	Cueva de Esteban Felipe	Eoceno medio	100
18	Caliza	Cueva Drólíca	Eoceno medio	100
19	Caliza	Calatorao	Jurásico	90
20	Caliza	Forro EPSH	¿Jurásico?	53
21	Estalactita	Cueva de los Murciélagos	Eoceno medio	100

en cantería tanto para el puente cercano, en el recrecimiento de la presa de Arguis e incluso en la valla del Parque Miguel Servet de Huesca.

Evolución del pH de la suspensión roca / agua. Como ya se ha indicado, uno de los objetivos de este artículo es comprobar los valores de pH de una suspensión agua / roca molida obtenidos en una investigación anterior. La evolución del pH de suspensión de roca molida en agua desionizada (1 : 2,5) en función del tiempo se presenta en las tablas III y IV, para dos texturas de molienda diferente (menores de 1 milímetro de luz y entre 1 y 2 milímetros de luz de tamiz).

Tabla III. pH de las muestras de rocas del valle del alto Isuela de textura fina (menos de 1 milímetro de luz) y relación roca / agua = 1 / 2,5.

Muestra	Roca	Tiempo de contacto agua / roca molida				
		1 hora	2 horas	5 horas	1 día	4 días
1	Arenisca	8,31	8,07	8,16	7,91	7,90
2	Caliza	8,21	7,96	7,93	7,76	7,77
3	Marga	8,26	8,11	8,13	7,92	7,86
4	Marga	7,88	7,74	7,78	7,62	7,57
5	Marga	8,68	8,49	8,49	8,21	8,07
6	Caliza	8,63	8,41	8,37	8,12	8,16
7	Caliza	8,70	8,53	8,47	8,2	8,15
8	Caliza	8,77	8,59	8,47	8,18	8,16
9	Caliza	7,98	7,83	7,90	7,70	7,70
10	Arenisca	8,99	8,85	8,84	8,48	8,26
11	Caliza	8,97	8,78	8,70	8,32	8,30
12	Caliza	8,87	8,62	8,48	8,16	8,17
13	Caliza	8,83	8,66	8,65	8,28	8,19
14	Mallacán	8,70	8,60	8,55	8,27	8,19
15	Arenisca	7,90	7,83	7,76	7,67	7,74
16	Arenisca	8,80	8,62	8,59	8,31	8,23
17	Caliza	8,87	8,65	8,54	8,21	8,18
18	Caliza	8,84	8,65	8,57	8,27	8,22
19	Caliza	8,75	8,58	8,51	8,23	8,26
20	Caliza	9,19	9,05	8,97	8,61	8,53
21	Estalactita	8,80	8,70	8,55	8,19	8,14

La mayor parte de las muestras presentan un pH superior a 8,5 al cabo de una hora de contacto. El pH más bajo corresponde a la muestra 15 (arenisca de Sabayés), con valores de 7,73 y 7,9. El más alto lo ofrece la caliza del forro arquitectónico de la EPSH, con un valor de 9,19. A efectos comparativos se ha analizado el pH de carbonato cálcico químicamente puro, obteniéndose valores de 9,05, 8,85 y 8,87, para tiempos superiores a media hora. Estos resultados sugieren que son correctos los elevados valores presentados por MONAJ y cols. (2014). Los experimentos sugieren, por otra parte, que el pH de equilibrio se alcanza con lentitud. Además, parece existir una influencia de la textura en los valores obtenidos para el mismo

Tabla iv. pH de muestras de rocas del valle del alto Isuela y textura gruesa (entre 1 y 2 milímetros de luz) y relación roca / agua = 1 / 2,5.

Muestra	Roca	Tiempo en el agua					
		2 horas	3 horas	4,5 horas	18 horas	1 día	2 días
1	Arenisca	8,80	8,75	8,59	8,11	8,20	8,07
2	Caliza	8,56	8,52	8,32	7,78	8,05	7,90
3	Marga	8,66	8,70	8,41	7,97	8,27	8,13
4	Marga	8,00	8,00	7,83	7,53	7,82	7,70
5	Marga	8,90	8,87	8,56	8,06	8,24	8,14
6	Caliza	8,79	8,77	8,49	7,96	8,19	8,08
7	Caliza	8,65	8,64	8,42	7,98	8,17	8,05
8	Caliza	8,77	8,75	8,47	8,04	8,20	8,05
9	Caliza	7,94	7,93	7,88	7,59	7,79	7,68
10	Arenisca	8,71	8,71	8,54	8,25	8,30	8,15
11	Caliza	8,85	8,83	8,67	8,16	8,27	8,13
12	Caliza	8,79	8,74	8,60	8,10	8,23	8,01
13	Caliza	8,81	8,77	8,54	8,08	8,20	8,08
14	Mallacán	8,79	8,72	8,58	8,10	8,12	8,11
15	Arenisca	7,73	7,67	7,57	7,51	7,62	7,55
16	Arenisca	8,51	8,50	8,48	8,05	8,23	8,14
17	Caliza	8,81	8,74	8,62	8,14	8,21	8,07
18	Caliza	8,81	8,72	8,67	8,14	8,23	8,13
19	Caliza	8,86	8,77	8,70	8,14	8,24	8,12
20	Caliza	8,87	8,73	8,71	8,19	8,29	8,15
21	Estalactita	8,69	8,55	8,52	8,05	8,19	8,09

tiempo. Comparando las tablas III y IV se observa que, para 2 horas de contacto, las calizas dan pH más bajos para la textura más fina. La mayor parte de las areniscas presentan un comportamiento inverso.

Lixiviados en columna. El objetivo de los experimentos de lixiviación es intentar reproducir en laboratorio los procesos de disolución de minerales de la roca por efecto del agua de lluvia midiendo la CE y el pH en función del agua percolada durante un máximo de 12 horas y recogida en fracciones de 12 cm³ hasta alcanzar un volumen de 120 cm³.

Las tablas V a VII presentan los datos de CE de los lixiviados por cada tipo de textura. Como ya se ha indicado, la percolación de cada muestra es diferente y aumenta con el tamaño de molienda. En general, las texturas más finas, a igualdad de volumen de lixiviado, dan conductividades eléctricas más altas posiblemente por ser mayor la superficie de contacto entre el agua y el sólido, favoreciendo las reacciones. Parece un tema de cinética, dado que en las texturas más gruesas el agua fluye con mayor rapidez y es menor el tiempo de contacto. Se aprecia que el salto más grande de CE se obtiene en el paso de textura media a fina.

En la granulometría más fina, la CE disminuye con el flujo de agua sugiriendo un fenómeno rápido de arrastre a modo de cromatografía, reproduciendo lo presentado por MONAJ (2003) y MONAJ y cols. (2014). En esta línea, en la granulometría intermedia aparecen máximos intermedios que parecen desplazarse hacia las fracciones posteriores en el tiempo y paso de agua en las texturas más gruesas. No hay una explicación clara para este comportamiento que, además de fenómenos cinéticos, pudiera ser un tema de flujos preferenciales. En las texturas más gruesas, más heterogéneas, el agua pudiera circular preferentemente por los conductos más grandes a más velocidad. Simultáneamente, habría otro flujo por los poros más pequeños, más lento y con más concentración, de modo que a la llegada de este segundo flujo, sube la conductividad eléctrica en ese momento.

Por las rocas se observa un comportamiento complejo. A partir de la tabla V, para el primer volumen de percolación y como era esperable, una muestra de arenisca del Mioceno (15) muestra el valor de CE más alto. Simplemente cabe indicar los problemas de haloclastia que presentan estas rocas en suelos y edificaciones en la hoya de Huesca donde es frecuente observar la presencia de eflorescencias salinas probablemente derivadas de

la hidrólisis de alguno de los minerales que las forman. Por otro lado, la conocida heterogeneidad de este tipo de roca se observa también cuando se compara con la muestra 16. Las margas de Arguis (3, 4 y 5) dan un elevado nivel de sales con un alto nivel en la muestra 4 coherente con la presencia puntual de eflorescencias en estos materiales, derivado de flujos de agua observados y poco estudiados. Las calizas también presentan una CE relativamente alta en las primeras fracciones. Esto recuerda los resultados obtenidos en el estudio de la relación agua / roca por agitación que se presentan en MONAJ y cols. (2014), donde los valores iniciales son muy superiores a los valores de CE de manantiales de la zona que se relacionan con estas rocas (BUERA y cols., 1997; PUYAL y cols., 1998; CUCHÍ y cols., 1999, 2002 y 2014; VILLARROEL y CUCHÍ, 2002 y 2004; OLIVÁN, 2013; ZUFIAURRE y cols., 2015). Sin embargo, los valores disminuyen rápidamente por debajo de los valores naturales de modo que se puede considerar que el agua natural es la mezcla de diferentes fracciones de lixiviación.

En tres muestras de roca (12, 15 y 17), se ha intentado analizar la relación entre la longitud del tubo del experimento y la CE del lixiviado, intentando simular el efecto de un aumento de la profundidad del suelo de 0,3 a 0,5 metros. Los resultados se presentan en la tabla VIII. Se observa que en las dos muestras de caliza (12 y 17), a mayor profundidad de suelo atravesado aumenta la conductividad. Sin embargo, en la arenisca de la muestra 15 se observa, entre el lecho largo frente al corto, un descenso intermedio de CE a igualdad de lixiviado que se recupera tras pasar un mayor volumen.

El estudio de la evolución del pH, que se presenta en las tablas IX a XI, es más complejo. Hay que señalar que en la medición de este parámetro no se ha tenido en cuenta el tiempo de flujo, al contrario de lo hecho en el apartado, ya descrito en la suspensión agua/roca. Es evidente que el tiempo de contacto es función del tipo de roca y del grado de molienda. A textura más fina, mayor tiempo es necesario para percolar los 12 mililitros. En general, a textura más gruesa e igual volumen percolado, se obtiene un pH más alto. En la primera fracción (12 mililitros), el pH más alto corresponde a la muestra de caliza de la boca de la cueva Drólica (9,81). El más bajo, 7,90, corresponde a la arenisca de Sabayés. En esta textura gruesa y para el primer volumen, 12 muestras presentan un pH superior a 9,00. Estos valores son similares a los obtenidos por MONAJ (2003) y presentados en MONAJ y

cols. (2014). Son del mismo orden que el presentado en el experimento de LETTERMAN (1995), realizado por agitación de una masa de caliza sólida en agua desionizada bajo condiciones cerradas. Por tanto, parece que el flujo en las condiciones del experimento puede considerarse como cerrado. Aparentemente debería observarse el mismo fenómeno en las texturas media y fina. Pero el pH de la primera fracción es más alto, en general, en la fracción gruesa que en la fina. Hay, por tanto, un efecto de la textura sobre el pH del lixiviado que podría estar en relación con el tiempo de contacto. A más tiempo de contacto, menor pH, contradiciendo lo señalado por LETTERMAN (1995). Y también parece estar en contradicción con lo afirmado por MONAJ (2003) y MONAJ y cols. (2014) sobre que sea un efecto derivado de la molienda. Esta hipótesis supone un calentamiento que puede llevar a la calcinación parcial con producción de óxidos cuya hidrólisis subiría el pH. Pero las texturas más finas que han sufrido una mayor molienda deberían dar un pH más alto, justamente lo contrario a lo que se obtiene. Por el momento no se ha encontrado explicación adecuada, dado que no parece fácil suponer que la fracción recalentada se concentra en el material más grueso. El aumento de la longitud supone un aumento del tiempo de percolación. De hecho, comparando los datos de las tablas XI y XII se observa para las calizas 16 y 17 un sensible descenso de pH a igualdad de volumen percolado. Por el contrario, en la arenisca de Sabayés no hay prácticamente variaciones.

Los resultados analíticos de ion calcio en los lixiviados por las columnas de 0,3 metros se encuentran en las tablas XIII a XV en la función de la textura. En general, se sigue la tendencia observada en la conductividad donde la concentración de Ca^{2+} del lixiviado es función del tipo de roca. Sorprende la caliza del puente Viejo en El Escalar de Arguis, que da un bajo porcentaje de CO_3Ca y, sin embargo, ofrece un lixiviado mas rico en Ca^{2+} . Evidentemente, se necesita un estudio más detallado. El contenido en ion de calcio disminuye en general al aumentar la textura y el volumen percolado. Sin embargo, en algunas muestras de texturas fina y mediana se observan picos de concentración en la segunda fracción sobre la segunda, especialmente en las margas. Una vez más, la arenisca de Sabayés presenta la singularidad de ofrecer la mayor concentración de Ca^{2+} en el lixiviado de la fracción más gruesa. A la vista de los resultados de la tabla XVI, aparentemente hay poco efecto en el incremento del espesor del lecho de percolación.

La interpretación de los resultados de la concentración de ion Mg^{2+} es más compleja (tablas XVII, XVIII y XIX). En general, hay mucho menos magnesio que calcio y el resultado depende del tipo de roca y de forma inversa a la textura y al volumen lixiviado. Pero las anomalías son abundantes, así como los errores analíticos. Abundan los valores nulos o muy bajos para varias calizas, pero otras ofrecen valores altos. El valor más alto es para la ya repetida arenisca de Sabayés. No queda clara la influencia del espesor del lecho (tabla XX).

CONCLUSIONES

Las rocas estudiadas muestran contenidos de carbonato cálcico relacionables con su naturaleza. Los pH en suspensión 1 : 2,5 ofrecen valores próximos a 9, ligeramente inferiores a los presentados en MONAJ y cols. (2014). En general, en los lixiviados, las conductividades eléctricas son función del grado de molienda, siendo mayor cuanto más fina es la textura. El pH de los lixiviados presenta un comportamiento complejo. En general, a texturas más gruesas, el pH es más elevado y este parámetro disminuye con el paso de agua. El ion de calcio en los lixiviados tiene una tendencia similar a la conductividad. Por el contrario, el magnesio tiene un comportamiento irregular. La longitud del lecho parece tener importancia en las calizas, de modo que a mayor longitud hay más contacto y más disolución. En areniscas y margas, el comportamiento es diferente.

Los resultados ofrecen información básica sobre diversas rocas de la zona. La mayor parte de los resultados son congruentes con la naturaleza de las rocas muestreadas. Pero se observan, por un lado, claras situaciones de heterogeneidad y, por otro, algunos resultados singulares como en la arenisca de Sabayés y las calizas de la zona del puente de El Escalar.

AGRADECIMIENTOS

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

Tabla VI. Conductividad eléctrica en $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 20 °C del lixiviado de rocas del Isuela en tubo de 30 centímetros de textura media (1 mm < \varnothing < 2 mm).

Muestra	Roca	Denominación	Peso en g	Mililitros percolados											
				12	24	36	48	60	72	84	96	108	120		
1	Arenisca	Bonés	204,9	123,9	105,4	103,0	102,1	205,0	246,0	163,4	163,4	114,2	94,5	82,0	
2	Caliza	Pico del Águila	214,9	496,0	674,0	1001,0	769,0	529,0	364,0	289,0	251,0	300,0	242,0	203,0	
3	Marga	Mesón Nuevo	209,1	570,0	707,0	800,0	675,0	552,0	427,0	352,0	300,0	242,0	286,0		
4	Marga	Rasal	195,2	1703,0	2270,0	2580,0	2120,0	1746,0	1616,0	1327,0	1296,0	1219,0	1203,0		
5	Marga	La Foz	201,5	599,0	955,0	690,0	549,0	393,0	313,0	270,0	261,0	249,0	260,0		
6	Caliza	Presa de Arguis	213,0	347,0	274,0	227,0	177,4	143,6	123,6	119,8	116,8	109,9	113,5		
7	Caliza	Medio	199,3	302,0	434,0	517,0	432,0	348,0	255,0	231,0	205,0	168,8	141,5		
8	Caliza	Cueva de Sanclemente	203,7	320,0	323,0	295,0	240,0	194,7	160,5	140,3	119,1	116,0	101,9		
9	Caliza	Puente Viejo	206,7	1868,0	4745,0	1747,0	1641,0	1369,0	1427,0	1334,0	1231,0	1146,0	934,0		
10	Arenisca	Molino de Arguis	193,2	143,1	191,2	241,0	208,0	149,4	112,3	92,8	77,2	68,8	66,6		
11	Caliza	Molino de Arguis II	207,4	128,1	124,3	113,9	105,8	93,3	90,0	79,6	78,8	75,4	66,2		
12	Caliza	Cantera de Boráu	222,0	150,3	117,0	95,2	84,9	74,6	70,5	68,3	69,2	79,8	62,6		
13	Caliza	Kilómetro 587	219,1	131,9	117,7	119,9	117,3	111,2	93,0	80,3	75,9	70,5	59,5		
14	Mallacán	Golf	210,4	107,1	108,8	105,4	88,1	78,8	74,5	71,1	68,1	65,4	58,0		
15	Arenisca	Sabayés	173,7	2840,0	2630,0	2450,0	2360,0	2300,0	2260,0	2220,0	2160,0	2160,0	2040,0		
16	Arenisca	Montearagón	192,1	997,0	762,0	591,0	408,0	348,0	266,0	205,0	177,6	149,5	96,0		
17	Caliza	Cueva de Esteban Felipe	208,7	178,3	123,2	104,1	93,3	90,0	87,1	83,1	81,6	78,1	66,2		
18	Caliza	Cueva Drólica	206,3	104,8	86,6	94,7	102,6	98,1	93,4	80,9	73,2	71,4	63,2		
19	Caliza	Calatorao	202,9	178,4	188,8	177,0	141,0	119,4	103,8	95,8	93,7	87,0	72,7		
20	Caliza	Forro EPSH	205,8	312,0	324,0	314,0	253,0	218,0	183,9	153,7	150,7	142,5	96,7		
21	Estalactita	Cueva de los Murciélagos	202,7	254,0	241,0	205,0	169,5	134,4	117,7	97,2	85,1	77,2	72,1		

Tabla VII. Conductividad eléctrica en $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 20 °C del lixiviado de rocas del valle del alto Isuela en tubo de 30 centímetros de textura gruesa ($\emptyset > 2 \text{ mm}$).

Muestra	Roca	Denominación	Peso en g	Militros percolados											
				12	24	36	48	60	72	84	96	108	120		
1	Arenisca	Bonés	229,1	108,5	85,3	88,8	92,5	97,1	98,8	93,8	91,7	87,3	82,3		
2	Caliza	Pico del Águila	231,4	181,3	148,2	148,7	154,5	194,9	205	164,3	146	144,5	132,3		
3	Marga	Mesón Nuevo	210,9	176,9	231	288	323	341	345	337	326	311	178,8		
4	Marga	Rasal	213,1	957	1255	1525	1723	1854	1886	1856	1793	1747	1697		
5	Marga	La Foz	222,9	191,3	162,7	177,1	245	206	274	249	177,5	137,1	235		
6	Caliza	Presa de Arguis	218,6	125,3	117,6	118	119,4	114,5	106,4	101,5	98,1	96,5	98,5		
7	Caliza	Medio	201,7	180,3	167,4	189	213	242	265	276	274	267	230		
8	Caliza	Cueva de Sanclemente	207,3	160,9	139,4	139,1	139,9	133,8	124,2	112,2	102,3	95,7	95		
9	Caliza	Puente Viejo	205,6	935	965	1073	1151	1227	1258	1246	1209	1164	1096		
10	Arenisca	Molino de Arguis	190,3	145,3	118,3	133,4	147,2	160,6	149,5	108,5	94,3	90,5	75		
11	Caliza	Molino de Arguis II	211,3	93,2	76,1	76	78,6	81,3	76,6	73,7	70,8	68,9	52,4		
12	Caliza	Cantera de Boráu	223,4	112	83	72,2	66,9	65,7	67,4	68,2	66,3	65	66,1		
13	Caliza	Kilómetro 587	220,6	121,8	111,5	90,3	85,1	82,4	77,9	76,7	72,4	69,7	85,9		
14	Mallacán	Golf	212,9	136,6	89,7	80,3	80,2	78,9	73,2	66,6	64,8	66,5	82		
15	Arenisca	Sabayés	175,8	2350	2470	2470	2460	2480	2480	2450	2410	2380	2430		
16	Arenisca	Montearagón	200,1	448	434	474	467	437	403	345	287	255	265		
17	Caliza	Cueva de Esteban Felipe	209,3	166,4	102,3	97,2	97,3	92	86,8	78,6	77,3	77,7	109,2		
18	Caliza	Cueva Dróllica	222,1	93,2	84	79,8	81,2	78,8	73,5	70,4	67,3	66,1	72,2		
19	Caliza	Calatorao	206,2	157,7	118,3	118,1	113,7	98	84,9	79	76	75,6	93,6		
20	Caliza	Forro EPSH	217,1	163,3	150	143,8	127,7	124,3	123,7	122,2	123,9	128,5	148,4		
21	Estalactita	Cueva de los Murciélagos	215,9	215	163	157,5	152,4	138,4	121,2	111,2	106,5	102,1	100,3		

Tabla VIII. Conductividad eléctrica en $\mu\text{S/cm}$ a 20 °C del lixiviado de rocas del valle del alto Isuela en tubo de 50 centímetros de textura gruesa ($\varnothing > 2 \text{ mm}$).

Muestra	Roca	Denominación	Peso en g	Mililitros percolados									
				12	24	36	48	60	72	84	96	108	120
12	Caliza	Cantera de Boráu	302,1	195	110	93	87,2	79,3	73,2	73	72,2	71,8	69,9
15	Arenisca	Sabayés	305,4	2360	1797	1859	2260	2560	2550	2490	2340	2410	2390
17	Caliza	Cueva de Esteban Felipe	308,5	273	150	122	121,3	124,9	116,5	108	110,2	101,5	112,7

Tabla x. pH del lixiviado de rocas del valle del alto Isuela en tubo de 30 centímetros de textura media (1 mm < Ø < 2 mm).

Muestra	Roca	Denominación	Mililitros percolados											
			12	24	36	48	60	72	84	96	108	120		
1	Arenisca	Bonés	8,93	8,90	8,81	8,82	8,43	8,26	8,34	8,59	8,71	8,74		
2	Caliza	Pico del Águila	8,27	8,18	8,01	8,12	8,23	8,46	8,46	8,47	8,55	8,50		
3	Marga	Mesón Nuevo	8,44	8,39	8,29	8,33	8,39	8,50	8,59	8,65	8,71	8,86		
4	Marga	Rasal	8,14	7,95	7,85	7,92	7,97	8,01	8,11	8,10	8,10	7,95		
5	Marga	La Foz	8,75	8,43	8,65	8,74	8,87	8,83	8,92	8,99	9,01	8,70		
6	Caliza	Presa de Arguis	8,73	8,72	8,70	8,84	8,91	8,90	8,97	8,88	8,95	8,68		
7	Caliza	Medio	8,59	8,36	8,23	8,13	8,34	8,57	8,62	8,66	8,69	8,52		
8	Caliza	Cueva de Sanclemente	8,67	8,55	8,55	8,61	8,73	8,78	8,93	8,85	8,82	8,73		
9	Caliza	Puente Viejo	7,88	7,89	7,83	7,80	7,91	7,87	7,93	7,92	8,00	7,90		
10	Arenisca	Molino de Arguis	8,91	8,62	8,37	8,37	8,47	8,37	8,53	8,74	8,76	8,39		
11	Caliza	Molino de Arguis II	8,83	8,70	8,61	8,86	8,88	8,78	8,82	8,68	8,71	8,88		
12	Caliza	Cantera de Boráu	8,49	8,69	8,81	8,72	8,71	8,82	8,82	8,96	8,69	8,81		
13	Caliza	Kilómetro 587	8,82	8,77	8,72	8,81	8,84	8,91	9,05	9,06	9,10	8,82		
14	Mallacán	Golf	8,69	8,50	8,41	8,44	8,34	8,31	8,38	8,43	8,43	7,98		
15	Arenisca	Sabayés	7,45	7,47	7,48	7,66	7,67	7,68	7,72	7,61	7,74	7,53		
16	Arenisca	Montearagón	7,94	8,05	8,08	8,28	8,30	8,48	8,84	8,89	8,95	8,79		
17	Caliza	Cueva de Esteban Felipe	8,60	8,62	8,64	8,59	8,64	8,75	8,81	8,81	8,83	8,73		
18	Caliza	Cueva Drólica	9,08	9,00	8,76	8,60	8,48	8,80	8,88	8,68	8,75	8,50		
19	Caliza	Calatorao	8,82	8,72	8,71	8,78	8,78	8,86	8,79	8,92	9,02	8,68		
20	Caliza	Forro EPSH	8,73	8,74	8,68	8,94	8,85	8,99	8,94	8,86	8,84	8,69		
21	Estalactita	Cueva de los Murciélagos	8,53	8,49	8,66	8,75	8,80	8,74	8,84	9,03	8,93	8,38		

Tabla xi. pH del lixiviado de rocas del valle del alto Isuela en tubo de 30 centímetros de textura gruesa ($\emptyset > 2$ mm).

Muestra	Roca	Denominación	Mililitros percolados											
			12	24	36	48	60	72	84	96	108	120		
1	Arenisca	Bonés	9,00	8,81	8,73	8,72	8,66	8,73	8,73	8,73	8,73	8,74	8,71	8,59
2	Caliza	Pico del Águila	9,07	9,17	9,09	9,07	8,87	8,70	8,67	8,67	8,67	8,68	8,72	8,56
3	Marga	Mesón Nuevo	8,83	8,73	8,69	8,60	8,57	8,54	8,53	8,53	8,53	8,55	8,57	8,26
4	Marga	Rasal	8,54	8,39	8,30	8,24	8,22	8,23	8,21	8,21	8,21	8,20	8,19	8,01
5	Marga	La Foz	9,61	9,68	9,67	9,58	9,63	9,48	9,46	9,46	9,46	9,55	9,60	9,25
6	Caliza	Presa de Arguis	9,45	9,44	9,48	9,43	9,46	9,47	9,49	9,47	9,49	9,47	9,45	9,08
7	Caliza	Medio	8,80	8,90	9,00	8,87	8,77	8,71	8,70	8,71	8,70	8,72	8,72	8,52
8	Caliza	Cueva de Sanclemente	9,24	9,25	8,25	9,27	9,25	9,30	9,32	9,30	9,32	9,35	9,34	9,34
9	Caliza	Puente Viejo	8,24	8,18	8,18	8,02	8,02	8,05	8,02	8,05	8,02	8,10	8,08	7,99
10	Arenisca	Molino de Arguis	8,96	8,84	8,66	8,74	8,79	8,79	8,69	8,69	8,69	8,82	8,83	8,59
11	Caliza	Molino de Arguis II	9,69	9,75	9,71	9,69	9,62	9,64	9,60	9,60	9,60	9,66	9,68	9,32
12	Caliza	Cantera de Boráu	9,65	9,69	9,70	9,70	9,61	9,59	9,55	9,55	9,55	9,53	9,52	9,45
13	Caliza	Kilómetro 587	9,63	9,64	9,65	9,69	9,65	9,62	9,62	9,62	9,62	9,59	9,56	9,24
14	Mallacán	Golf	9,43	9,45	9,53	9,50	9,52	9,59	9,61	9,59	9,61	9,63	9,60	9,30
15	Arenisca	Sabayés	7,90	7,79	7,88	7,93	7,96	7,96	7,97	7,96	7,97	7,99	8,02	7,97
16	Arenisca	Montearagón	8,05	8,12	8,18	8,19	8,21	8,31	8,35	8,31	8,35	8,31	8,36	8,36
17	Caliza	Cueva de Esteban Felipe	9,37	9,60	9,63	9,57	9,61	9,60	9,69	9,60	9,69	9,65	9,70	9,13
18	Caliza	Cueva Drólica	9,81	9,77	9,71	9,67	9,67	9,70	9,74	9,70	9,74	9,69	9,75	9,18
19	Caliza	Calatorao	9,45	9,52	9,47	9,47	9,59	9,65	9,64	9,65	9,64	9,72	9,69	9,13
20	Caliza	Forro EPSH	8,83	9,03	9,02	9,15	9,21	9,30	9,22	9,30	9,22	9,21	9,16	8,60
21	Estalactita	Cueva de los Murciélagos	8,74	8,89	8,94	8,94	8,99	8,99	8,98	8,99	8,98	9,08	9,04	8,45

Tabla XII. pH del lixiviado de rocas del valle del alto Isuela en tubo de 50 centímetros de textura gruesa ($\varnothing > 2 \text{ mm}$).

Muestra	Roca	Denominación	Mililitros percolados											
			12	24	36	48	60	72	84	96	108	120		
12	Caliza	Cantera de Boráu	9,16	9,29	9,22	9,20	9,18	9,33	9,20	9,20	9,20	9,19	9,18	8,91
15	Arenisca	Sabayés	7,91	7,93	8,00	7,96	7,96	7,94	7,94	7,91	7,91	7,99	7,99	7,92
17	Caliza	Cueva de Esteban Felipe	8,57	8,69	8,59	8,53	8,39	8,44	8,53	8,44	8,53	8,47	8,56	8,55

Tabla xiv. Concentración de ion de calcio (mg/l) en el lixiviado de rocas del valle del alto Isuela en tubo de 30 centímetros de textura mediana (1 mm < Ø < 2 mm).

Muestra	Roca	Denominación	Mililitros percolados											
			12	24	36	48	60	72	84	96	108	120		
1	Arenisca	Bonés	47,3	17,6	19,2	16,8	28,1	36,9	26,5	19,2	22,4	13,6		
2	Caliza	Pico del Águila	155,5	124,2	125,9	151,5	114,6	56,9	51,3	47,3	40,9	37,7		
3	Marga	Mesón Nuevo	104,2	93,0	85,0	76,2	65,7	56,1	52,1	48,1	46,5	45,7		
4	Marga	Rasal	153,9	232,5	240,5	240,5	216,4	200,4	208,4	216,4	224,4	240,5		
5	Marga	La Foz	42,5	72,1	57,7	43,3	35,3	28,1	24,8	21,6	22,4	22,4		
6	Caliza	Presa de Arguis	27,3	30,5	26,5	22,4	19,2	16,8	17,6	17,6	15,2	12,8		
7	Caliza	Medio	34,5	45,7	46,5	46,5	36,1	26,5	24,0	22,4	23,2	24,0		
8	Caliza	Cueva de Sanclemente	44,1	43,3	38,5	33,7	32,1	31,3	29,7	28,1	26,5	24,0		
9	Caliza	Puente Viejo	400,8	384,8	384,8	384,8	360,7	336,7	304,6	280,6	248,5	216,4		
10	Arenisca	Molino de Arguis	32,1	30,5	32,9	36,1	28,9	21,6	20,0	19,2	17,6	16,8		
11	Caliza	Molino de Arguis II	29,7	28,1	28,1	27,3	25,7	24,0	23,2	21,6	20,0	17,6		
12	Caliza	Cantera de Boráu	30,5	31,3	26,5	22,4	19,2	15,2	17,6	19,2	17,6	16,0		
13	Caliza	Kilómetro 587	24,0	25,7	22,4	19,2	21,6	24,0	22,4	20,0	16,8	13,6		
14	Mallacán	Golf	30,5	24,0	21,6	18,4	20,0	20,8	19,2	17,6	12,8	10,4		
15	Arenisca	Sabayés	481,0	529,1	505,0	481,0	489,0	497,0	497,0	505,0	505,0	505,0		
16	Arenisca	Montearagón	173,1	120,2	91,4	62,5	52,9	42,5	31,3	20,0	18,4	16,8		
17	Caliza	Cueva de Esteban Felipe	50,5	40,1	28,9	18,4	20,0	20,8	20,0	19,2	15,2	11,2		
18	Caliza	Cueva Drólica	32,1	26,5	24,0	21,6	23,2	24,8	20,8	17,6	15,2	12,0		
19	Caliza	Calatorao	35,3	34,5	32,1	30,5	28,1	24,8	22,4	19,2	18,4	15,2		
20	Caliza	Forro EPSH	40,1	36,1	34,5	32,1	29,7	27,3	25,7	24,0	21,6	19,2		
21	Estalactita	Cueva de los Murciélagos	52,1	48,1	43,3	38,5	35,3	32,1	0,0	0,0	0,0	14,4		

Tabla xv. pH Concentración de ion de calcio (mg/l) en el lixiviado de rocas del valle del alto Isuela en tubo de 30 centímetros de textura gruesa ($\emptyset > 2$ mm).

Muestra	Roca	Denominación	Mililitros percolados												
			12	24	36	48	60	72	84	96	108	120			
1	Arenisca	Bonés	18,4	19,2	16,8	13,6	14,4	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	15,2	12,8
2	Caliza	Pico del Águila	28,1	27,3	30,5	32,9	33,7	35,3	31,3	31,3	31,3	31,3	24,0	21,6	20,0
3	Marga	Mesón Nuevo	19,2	28,1	30,5	32,1	36,1	40,1	38,5	38,5	38,5	35,3	36,1	40,1	40,1
4	Marga	Rasal	192,4	168,3	208,4	240,5	264,5	280,6	272,5	272,5	272,5	256,5	256,5	248,5	248,5
5	Marga	La Foz	26,5	15,2	16,8	21,6	20,8	19,2	17,6	17,6	17,6	15,2	16,0	17,6	17,6
6	Caliza	Presa de Arguis	14,4	13,6	13,6	12,8	12,8	13,6	13,6	13,6	13,6	13,6	13,6	13,6	13,6
7	Caliza	Medio	16,8	16,0	18,4	19,2	20,8	22,4	24,0	24,0	24,0	25,7	25,7	26,5	26,5
8	Caliza	Cueva de Sanclemente	24,0	19,2	19,2	18,4	18,4	18,4	16,8	16,8	16,8	15,2	12,8	10,4	10,4
9	Caliza	Puente Viejo	176,4	168,3	184,4	200,4	216,4	240,5	240,5	240,5	240,5	232,5	216,4	200,4	200,4
10	Arenisca	Molino de Arguis	17,6	17,6	19,2	20,8	21,6	22,4	20,8	22,4	20,8	16,0	14,4	12,0	12,0
11	Caliza	Molino de Arguis II	14,4	14,4	14,4	15,2	14,4	14,4	14,4	14,4	14,4	14,4	14,4	15,2	16,0
12	Caliza	Cantera de Boráu	16,8	11,2	11,2	11,2	13,6	15,2	13,6	15,2	13,6	12,0	12,0	12,0	12,0
13	Caliza	Kilómetro 587	22,4	20,0	18,4	16,0	22,4	13,6	14,4	14,4	14,4	15,2	16,0	20,0	20,0
14	Mallacán	Golf	20,0	16,0	15,2	15,2	14,4	14,4	12,8	12,8	12,8	11,2	11,2	18,4	18,4
15	Arenisca	Sabayés	489,0	497,0	505,0	521,0	537,1	545,1	537,1	537,1	537,1	521,0	521,0	521,0	521,0
16	Arenisca	Montearagón	88,2	64,1	64,1	64,1	64,1	64,1	48,1	48,1	48,1	40,1	32,1	24,0	24,0
17	Caliza	Cueva de Esteban Felipe	41,7	26,5	27,3	28,9	27,3	25,7	22,4	22,4	22,4	19,2	16,8	24,8	24,8
18	Caliza	Cueva Dróllica	16,0	16,0	17,6	20,0	18,4	15,2	13,6	13,6	12,8	12,8	12,8	18,4	18,4
19	Caliza	Calatorao	25,7	19,2	18,4	18,4	16,0	13,6	12,0	12,0	11,2	10,4	13,6	13,6	13,6
20	Caliza	Forro EFSH	21,6	21,6	20,0	19,2	17,6	16,8	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	11,2	11,2
21	Estalactitas	Cueva de los Murciélagos	32,1	28,1	26,5	25,7	22,4	18,4	18,4	18,4	18,4	18,4	17,6	13,6	13,6

Tabla XVI. Concentración de ion de calcio (mg/l) en el lixiviado de rocas del valle del alto Isuela en tubo de 50 centímetros de textura mediana ($\varnothing > 2$ mm).

Muestra	Roca	Denominación	Mililitros percolados									
			12	24	36	48	60	72	84	96	108	120
12	Caliza	Cantera de Boráu	23,2	16,8	16,0	15,2	14,4	13,6	12,8	12,0	11,2	10,4
15	Arenisca	Sabayés	553,1	408,8	472,9	521,0	529,1	537,1	529,1	529,1	529,1	537,1
17	Caliza	Cueva de Esteban Felipe	51,3	36,1	34,5	32,9	32,1	32,1	32,1	32,1	30,5	29,7

Tabla xvii. Concentración en mg/l del ion de magnesio en el lixiviado de rocas del valle del alto Isuela en tubo de 30 centímetros de textura fina ($\varnothing < 1 \text{ mm}$).

Muestra	Roca	Denominación	Mililitros percolados												
			12	24	36	48	60	72	84	96	108	120			
1	Arenisca	Bonés	-55,0	-18,0	-3,4	-3,4									
2	Caliza	Pico del Águila	292,8	126,5	35,5	9,7	0,0	0,5	73,0	-4,9	-7,3	0,0			
3	Marga	Mesón Nuevo	340,5	382,3	206,2	25,3									
4	Marga	Rasal	0,0	-124,0	-79,3										
5	Marga	La Foz	107,0	-223,7	24,3	4,9									
6	Caliza	Presa de Arguis	2,9	6,3	5,8	5,8	1,5	4,9	1,9	3,4	2,9	-111,9			
7	Caliza	Medio	193,6	3,9	0,0	5,4	4,4	4,9	4,4	4,4	1,0	2,4			
8	Caliza	Cueva de Sanclemente	20,4	5,4	2,9	5,4	3,9	3,9	5,4	2,9	1,5	1,5			
9	Caliza	Puente Viejo	-348,7	-218,9	-153,2	-116,7	-121,6								
10	Arenisca	Molino de Arguis	29,2	9,2	2,9	2,9	4,4	4,4	3,9	3,9	3,9	2,9			
11	Caliza	Molino de Arguis II	1,0	4,4	4,4	4,9	2,4	2,4	4,4	2,4	2,9	1,9			
12	Caliza	Cantera de Boráu	14,6	29,2	19,5										
13	Caliza	Kilómetro 587	8,3	5,8	5,4	3,4	2,4	2,4	1,5	1,9	2,4	2,9			
14	Mallacán	Golf	3,9	1,5	2,4	1,0	1,0	0,5	1,5	1,5	2,4	1,9			
15	Arenisca	Sabayés	909,6	403,7	0,0	0,0	0,0	466,9	437,8	389,1					
16	Arenisca	Montearagón	53,5	14,6	4,9	0,0	0,0	2,4							
17	Caliza	Cueva de Esteban Felipe	8,8	2,4	5,4	0,5	2,9	6,3	4,9	2,9	3,9	3,9			
18	Caliza	Cueva Dróllica	8,8	3,4	3,9	3,9	2,4	4,9	4,9	2,4	1,5	1,9			
19	Caliza	Calatorao	5,8	3,4	2,4	3,9	1,9	1,9	1,5	2,9	1,9	0,5			
20	Caliza	Forro EFSH	63,7	13,6	16,1	4,4	1,5	1,9	1,9	6,3					
21	Estalactita	Cueva de los Murciélagos	37,9	6,8	2,9	5,4									

Los resultados en negativo se consideran como errores.

Tabla XVIII. Concentración en mg/l del ion de magnesio en el lixiviado de rocas del valle del alto Isuela en tubo de 30 centímetros de textura mediana (1 mm ϕ <math>< 2\text{ mm}</math>).

Muestra	Roca	Denominación	Mililitros percolados											
			12	24	36	48	60	72	84	96	108	120		
1	Arenisca	Bonés	1,9	2596,4	2600,3	5,4	9,7	1,9	1,0	2,9	1,0	1,5		
2	Caliza	Pico del Águila	2,9	0,0	68,1	7,8	1,0	7,3	3,4	1,5	1,5	1,5		
3	Marga	Mesón Nuevo	11,7	18,0	27,7	37,9	32,1	25,8	25,3	24,8	15,6	8,8		
4	Marga	Rasal	163,4	277,2	277,2	291,8	257,8	218,9	204,3	184,8	175,1	155,6		
5	Marga	La Foz	13,6	36,5	25,8	15,1	8,3	1,5	2,9	4,4	5,4	5,4		
6	Caliza	Presa de Arguis	10,7	1,0	1,0	0,5	0,5	0,0	-0,5	0,5	0,5	0,5		
7	Caliza	Medio	0,5	0,5	0,5	1,0	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5		
8	Caliza	Cueva de Sanclemente	14,6	9,7	9,2	8,8	5,8	2,9	3,4	3,9	1,9	1,0		
9	Caliza	Puente Viejo	121,6	121,6	102,1	82,7	63,2	48,6	58,4	63,2	73,0	77,8		
10	Arenisca	Molino de Arguis	1,5	5,4	3,9	2,4	1,9	1,5	1,5	0,5	0,5	0,5		
11	Caliza	Molino de Arguis II	1,5	1,9	1,9	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5	1,0	0,5		
12	Caliza	Cantera de Boráu	1,0	0,5	1,0	0,5	0,5	1,5	1,0	1,5	-0,5	0,0		
13	Caliza	Kilómetro 587	4,9	1,5	2,4	2,9	1,9	1,0	1,5	2,4	1,9	1,5		
14	Mallacán	Golf	1,0	0,0	0,5	1,0	0,5	0,5	-0,5	-1,0	0,5	0,5		
15	Arenisca	Sabayés	199,4	141,1	141,1	141,1	165,4	189,7	141,1	87,6	68,1	43,8		
16	Arenisca	Montearagón	13,1	10,2	5,8	1,0	1,0	1,0	3,9	7,3	3,9	1,9		
17	Caliza	Cueva de Esteban Felipe	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	0,5	1,5	1,9		
18	Caliza	Cueva Drólica	14,6	3,4	2,9	2,4	1,5	0,5	1,9	2,9	2,4	2,4		
19	Caliza	Calatorao	6,3	3,4	3,9	3,4	2,4	1,9	2,4	3,4	2,4	2,9		
20	Caliza	Forro EPSH	31,6	24,3	15,6	13,6	11,2	8,8	7,3	5,8	5,4	4,9		
21	Estalactita	Cueva de los Murciélagos	7,3	8,3	7,3	5,8	4,4	2,9	0,0	0,0	0,0	3,4		

Tabla XIX. Concentración de ion de magnesio (mg/l) en el lixiviado de rocas del valle del alto Isuela en tubo de 30 centímetros de textura gruesa ($\emptyset > 2$ mm).

Muestra	Roca	Denominación	Mililitros percolados												
			12	24	36	48	60	72	84	96	108	120			
1	Arenisca	Bonés	5,8	0,0	1,0	1,5	1,0	0,5	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0	0,5	1,9
2	Caliza	Pico del Águila	0,0	0,0	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	2,4	1,9	1,0
3	Marga	Mesón Nuevo	7,3	8,8	16,5	19,9	20,4	20,4	20,9	16,1	14,1	14,1	14,6	13,6	
4	Marga	Rasal	24,3	9,7	58,4	116,7	116,7	116,7	126,5	116,7	111,9	111,9	107,0	92,4	
5	Marga	La Foz	1,0	2,9	7,8	6,3	6,3	6,3	6,3	5,8	5,4	5,4	5,4	4,9	
6	Caliza	Presa de Arguis	1,0	1,0	0,5	1,0	1,0	1,0	0,5	0,5	0,0	0,0	0,5	0,5	
7	Caliza	Medio	1,5	1,9	1,0	0,5	1,9	1,9	2,4	1,9	1,5	1,5	1,0	0,5	
8	Caliza	Cueva de Sanclemente	2,9	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	1,9	1,9	
9	Caliza	Puente Viejo	14,6	24,3	24,3	29,2	29,2	29,2	24,3	19,5	19,5	19,5	24,3	24,3	
10	Arenisca	Molino de Arguis	1,9	1,5	1,9	1,9	2,9	2,9	3,9	2,4	2,4	2,4	1,9	2,4	
11	Caliza	Molino de Arguis II	2,4	1,5	1,0	0,5	1,0	1,0	1,5	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	
12	Caliza	Cantera de Boráu	1,9	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,0	
13	Caliza	Kilómetro 587	1,0	1,5	1,0	0,5	-3,9	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	
14	Mallacán	Golf	2,4	2,4	1,0	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5	1,5	1,9	1,0	
15	Arenisca	Sabayés	38,9	38,9	38,9	34,0	48,6	48,6	68,1	43,8	24,3	24,3	48,6	73,0	
16	Arenisca	Montearagón	4,9	4,9	4,9	0,0	0,0	0,0	4,9	9,7	4,9	4,9	4,9	7,3	
17	Caliza	Cueva de Esteban Felipe	1,5	1,0	1,0	1,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	
18	Caliza	Cueva Dróllica	1,5	1,5	1,5	1,9	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	
19	Caliza	Calatorao	1,0	1,5	1,5	1,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,9	
20	Caliza	Forro EPSH	3,4	3,4	2,9	1,9	1,9	1,9	1,9	2,4	2,4	2,4	2,4	5,4	
21	Estalactita	Cueva de los Murciélagos	2,4	1,5	1,5	1,5	2,4	2,4	3,4	3,4	3,4	3,4	2,9	1,9	

Tabla xx. Concentración de ion de magnesio (mg/l) en el lixiviado de rocas del valle del alto Isuela en tubo de 50 centímetros de textura mediana ($\varnothing > 2$ mm).

Muestra	Roca	Denominación	Mililitros percolados											
			12	24	36	48	60	72	84	96	108	120		
12	Caliza	Cantera de Boráu	1,5	1,9	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
15	Arenisca	Sabayés	43,8	9,7	9,7	24,3	34,0	48,6	48,6	48,6	48,6	48,6	53,5	53,5
17	Caliza	Cueva de Esteban Felipe	4,4	5,4	3,4	1,5	1,5	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	1,5	1,5

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BERNER, E. K., y R. A. BERNER (1987). *The global water cycle, geochemistry and environment*. Prentice Hall. Englewood Cliffs (NJ). 397 pp.
- 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.
- CUCHÍ, J. A., y J. A. MANSO (1997). Calidad química de la nieve del Pirineo altoaragonés en 1997. En *I Congreso Ibérico de Geoquímica – VII Congreso de Geoquímica de España*: 427-433. Cedex. Madrid.
- 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.
- FIGUEIREDO, C. A., J. M. MARQUES, 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 9th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone*, vol. 1: 79-87. Elsevier. Ámsterdam / Nueva York.
- LETTERMAN, R. (1995). *Calcium carbonate dissolution rate in limestone contactors*. EPA/600/SR95/068. Environmental Protection Agency. Cincinnati (OH). 7 pp.
- 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 CaCO_3 - H_2O - 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. 398 pp.
- MINGZHAO, H. (2005). *Slurry rheology of limestone and its effects on wet ultra-fine grinding*. Lulea University of Technology. 185 pp.
- MIJAILOV, L. (1985). *Hidrogeología*. Mir. Moscú. 285 pp.
- MONAJ, D. (2003). *Interacción agua-roca en casos concretos del Prepirineo altoaragonés*. Proyecto fin de carrera. Ingeniería Química. Centro Politécnico Superior. Universidad de Zaragoza.

- MONAJ, D., J. L. VILLARROEL, J. A. MANSO y J. A. CUCHÍ (2014). Reacciones agua-roca en la cuenca alta de los ríos Isuela y Flumen (Huesca). *Lucas Mallada*, 16: 169-197.
- MONTES, M. J. (2009). *Estratigrafía de Eoceno-Oligoceno de la cuenca de Jaca: sinclinorio del Guarga*. IEA (Colección de Estudios Altoaragoneses, 59). Huesca. 355 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.
- 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. 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.
- 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.
- ZUFIAURRE, R., L. TRABA y J. A. CUCHÍ (2015). Caracterización hidroquímica de aguas en la hoya de Huesca. *Lucas Mallada*, 17: 17-44.