



MINISTERIO  
DE CIENCIA  
E INNOVACIÓN



Instituto Geológico  
y Minero de España

## CALIDAD QUÍMICA DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN UNA ZONA DE ACTIVIDAD MINERA (CUENCA DEL BIERZO-LEÓN)



**Proyecto: *Evaluación del impacto y restauración ambiental de la Cuenca minera del Bierzo.***

**Responsable: *LUCAS VADILLO***

# CALIDAD QUÍMICA DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN UNA ZONA DE ACTIVIDAD MINERA (CUENCA DEL BIERZO)

A. de la Losa Román<sup>1</sup>; L. Moreno Merino<sup>1</sup>; Núñez Monasterio I<sup>2</sup>.

- (1) Instituto Geológico y Minero de España (IGME). C/ Ríos Rosas, 23. 28003 Madrid (España) E-mail: [a.delalosa@igme.es](mailto:a.delalosa@igme.es) ; [l.moreno@igme.es](mailto:l.moreno@igme.es)
- (2) Centro de Estudios Hidrográficos (CEDEX). Paseo bajo de la Virgen del Puerto, 3. 28005 Madrid (España). E-mail: [irene.nunez@cedex.es](mailto:irene.nunez@cedex.es)

## Resumen

La cuenca minera del Bierzo presenta numerosas estructuras mineras que pueden afectar negativamente el medio hídrico subterráneo; con objeto de evaluar su posible alteración desde el punto de vista de la calidad del agua, en especial el contenido en metales pesados procedentes de procesos de oxidación de sulfuros metálicos, se ha llevado a cabo una campaña de muestreo de aguas subterráneas y superficiales ligadas a las mismas. En total se han seleccionado 37 puntos de muestreo, de los cuales 26 son fuentes o manantiales, 7 pozos someros con uso fundamentalmente agrícola y 4 aguas superficiales, ríos con conexión directa o indirecta con las aguas subterráneas.

## Introducción y objetivos

La cuenca minera del Bierzo (IGME, 1984) se localiza en la zona Asturoccidental –Leonesa, al NO de la provincia de León. Su edad es Estefaniense, yaciendo discordante sobre materiales que abarcan desde el Precámbrico hasta el Silúrico y cubiertos en algunos lugares por depósitos terciarios y cuaternarios.

La zona central de la cuenca ocupada por materiales terciarios y cuaternarios, (representados principalmente por arenas, arcillas y gravas) muestran relieves suaves con altitudes medias de unos 600 m.s.n.m, alcanzando en el norte hasta 800 m.s.n.m. Los materiales paleozoicos (constituidos por conglomerados, pizarras, areniscas y cuarcitas) de relieve más accidentado dan lugar a un orla montañosa con altitudes que superan los 1000 m.

La red hidrográfica de esta Cuenca está constituida principalmente por el río Sil que discurre de N a SE y sus afluentes: ríos Boeza, Tremor y Valdesamario, por su margen izquierda; y Cúa por su margen derecha, así como numerosos arroyos subsidiarios.

Como consecuencia de la intensa actividad minera, principalmente de carbón y hierro, son numerosas las estructuras mineras sin restaurar que pueden afectar negativamente al medio. Estas operaciones de minería dan lugar a la exposición del material y oxidación de la piritita que acompaña al carbón, pudiendo generar aguas ácidas que ayudan a la movilización de

metales pesados y sulfuros. El problema de contaminación se agrava cuando las aguas de mina tienen acceso directo a sistemas hidrológicos superficiales o a sistemas acuíferos subterráneos.

Este estudio tratará de evaluar la afección de las aguas subterráneas debido a posibles drenajes ácidos y a la liberación de metales pesados, para ello, se ha llevado a cabo una campaña de muestreo de aguas subterráneas y superficiales.

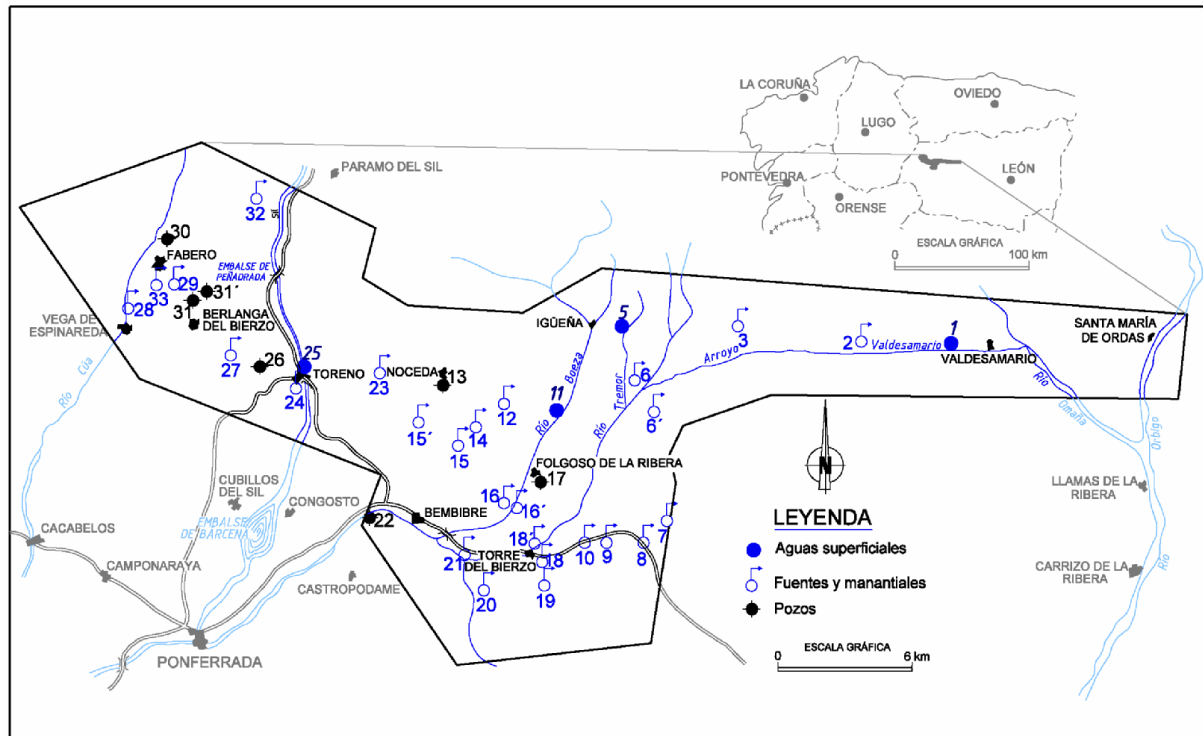


Figura 1.- Puntos de muestreo de aguas superficiales y subterráneas en la cuenca minera del Bierzo. Modificado de IGME (1984).

## Materiales y métodos

Se han seleccionado 37 puntos de muestreo (Figura 1), de los cuales 26 son fuentes o manantiales, 7 pozos y 4 cauces de agua superficial. La mayor parte de los puntos se utilizan para riego y abastecimiento, total o parcialmente, y en algunos casos, su uso es esporádico. Los pozos son de escasa profundidad, en general entre 6 y 9 m. Los manantiales y fuentes, en su mayor parte usados para abastecimiento, tienen caudales muy variables, superándose en raras ocasiones 1 l/s. Las cotas a las cuales se encuentran estos puntos son muy variables, entre 600 y 1200 m aproximadamente, siendo éstas últimas entre las cuales se localizan las capas explotables de carbón. Los puntos controlados se encuentran sobre materiales paleozoicos, terciarios y cuaternarios.

La campaña de muestreo tuvo lugar a lo largo de enero y febrero de 2007. Los parámetros físico-químicos controlados han sido: temperatura, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto y caudal o nivel piezométrico. Se han tomado 2 muestras en cada uno de los puntos, una de las cuales se ha acidulado con  $\text{HNO}_3$  a  $\text{pH} < 2$ , para el posterior análisis de metales pesados en el laboratorio del IGME. Los elementos mayoritarios se han determinado mediante

Espectrofotometría de Absorción, mientras que los metales pesados se han analizado mediante ICP/MS.

Tabla 1.- Datos medidos “in situ” de los puntos muestreados en la cuenca minera del Bierzo.

Punto	Nombre	Fecha	Coordenadas		Cota (m)	T°	pH	Cond. (µS/cm)	Nivel (m)	Caudal (l/s)
			UTMX	UTMY						
1	A° Valdesamario	5/02/07	745281	4734941	1082	5,7	6,2	66	-	-
2	Fte. Murias de Ponjos	5/02/07	739552	4734050	1204	5,6	4,9	19	-	0,07
3	Man. Espina Tremor	5/02/07	733272	4734733	1263	6,7	5,6	22	-	-
5	A° Rodrigatos	5/02/07	725151	4733740	1015	7,5	6,5	547	-	-
6	Fte. Rodrigatos	5/02/07	725622	4738340	978	10	6,8	201	-	0,2
6 b	Fte. Pobladura de las Regueras	5/02/07	727109	4731088	906	11	5,5	84	-	0,24
7	Fte. Brañuelas	5/02/07	729650	4723984	1076	9,2	4,1	21	-	0,66
8	Fte. Ucedo	1/02/07	730082	4719154	1160	6,3	6,1	16	-	0,45
9	Fte. Manzanal del Puerto	1/02/07	728100	4719213	1156	11	5,2	77	-	-
10	Fte. La Silva	1/02/07	724381	4720684	900	12	5,5	15	-	0,3
11	Río Boeza	30/1/07	721454	4729853	853	7	6,3	555	-	-
12	Fte. San Isidro (Cabanillas)	30/1/07	718774	4731373	960	5,6	6,4	23	-	0,05
13	Pozo Noceda del Bierzo	30/1/07	713854	4731152	805	9,1	6,2	231	Surg.	-
14	Fte. de la Mora	30/1/07	715776	4727037	988	5,4	5,4	20	-	2,5 (e)
15	Fte. de Tedejo	30/1/07	714891	4725940	846	10	5,3	45	-	0,66
15 b	Manantial de Arlanza	30/1/07	711215	4728097	903	8,7	5,3	26	-	0,13
16	Fte. De la Cancilla (Folgozo)	29/1/07	718064	4722200	740	14	7,4	283	-	-
16 b	Fte. C/ Travesía Mayor (Folgozo)	29/1/07	718062	4722199	730	12	6,1	250	-	3,5
17	Pozo Folgozo	30/1/07	719998	4724854	768	10	6,9	478	6	-
18	Fte. Polideportivo (Torre)	1/02/07	720557	4719548	836	5,8	5,4	29	-	-
18 b	Fte. La Piñuela	1/02/07	722422	4722009	833	11	5,6	108	-	0,4
19	Fte. del Refugio	1/02/07	720788	4716196	826	4,2	5,2	22	-	-
20	Fte de Abranales	29/1/07	715206	4717734	708	8,3	5,1	238	-	0,02
21	Fte. de las Tripas (Venta Albares)	29/1/07	713987	4720168	671	12	5,3	124	-	2
22	Pozo Almázcara	29/1/07	704620	4719077	592	12	6,1	352	3,57	-
23	Manantial de Robledo	30/1/07	710019	4732946	978	11	5,8	28	-	4
24	Man. Hostal Salomé (Toreno)	30/1/07	715776	4727036	990	11	6,8	535	-	0,25
25	Río Sil	30/1/07	703959	4731027	658	7,5	7,1	202	-	-
26	Pozo Tombrio de Abajo	31/1/07	700582	4731790	747	6,7	7,5	242	1,5	-
27	Fte Tombrio de Arriba	31/1/07	698352	4732523	782	8,1	4,5	196	-	0,2
28	Captación Sésamo	31/1/07	691035	4734579	692	11	6,1	35	-	4 (e)
29	Manantial Otero	31/1/07	695941	4737837	846	6,9	7,4	328	-	0,07
30	Pozo de Lillo	31/1/07	695863	4739664	813	11	6,7	670	4,03	-
31	Pozol S. Miguel de Langre	31/1/07	698302	4734596	887	9,8	6,4	297	2	-
31 b	Pozo2 S. Miguel de Langre	31/1/07	698199	4734532	884	12	7,3	332	Surg.	-
32	Fuente de la Urz	31/1/07	695849	4733667	808	10	4,5	28	-	0,17
33	Fuente del Cangalón	31/1/07	694098	4736388	692	12	5,4	67	-	0,26

## Resultados y discusión

### *Características hidrogeológicas de la cuenca*

La cuenca del Bierzo, desde el punto de vista hidrogeológico, esta constituida por materiales paleozoicos (pizarras, areniscas, cuarcitas y conglomerados principalmente) que se comportan en su conjunto como impermeables, aunque localmente pueden tener una cierta permeabilidad ligada a zonas de diaclasamiento y fracturación, que permiten el desarrollo de zonas de circulación preferente del agua subterránea.

Los materiales terciarios-cuaternarios constituyen un acuífero de carácter detrítico permeable. Su permeabilidad será diferente según su composición litológica, siendo mayor en zonas con más abundancia de arenas y conglomerados, así como la fracción fina o gruesa y dependiendo de su posición en el borde o centro de la cuenca.

### *Características generales (físico-químicas) de las aguas*

La Tabla 2 y Tabla 3 muestra los datos analíticos de los puntos controlados (ANEXO 1). Las aguas superficiales presentan en general pH ácido, variando entre 6,2 y 6,5 unidades salvo el río Sil (pH = 7,1), que ha sido muestreado a la altura de Toreno. Los valores de conductividad

eléctrica corresponden a aguas de mineralización débil, oscilando entre 66  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y 555  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Las conductividades más bajas se observan en la cuenca alta del arroyo Valdesamario (66  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), se trata básicamente de agua de escorrentía sub-superficial que atravesando materiales paleozoicos (pizarras) no tienen tiempo de interaccionar con el sustrato. Las conductividades más elevadas se deben al drenaje de sistemas más complejos y al aporte de aguas subterráneas más mineralizadas.

Tabla 2.- Datos de análisis de mayoritarios de las muestras.

Punto	Cl	SO <sub>4</sub>	HCO <sub>3</sub>	NO <sub>3</sub>	Na	Mg	Ca	K	SiO <sub>2</sub>
	(mg/L)				(mg/L)				
1	1	21	11	0	0	4	6	0	5,9
2	1	5	5	0	2	1	1	0	7,7
3	1	5	5	2	0	1	3	0	4,9
5	3	302	41	0	5	53	56	0	8,4
6	6	29	89	0	5	11	24	0	14,2
6 b	1	19	21	6	3	3	9	0	8,5
7	1	5	5	2	0	1	3	0	5,1
8	1	3	1	0	0	1	2	0	8,2
9	8	11	8	10	7	2	4	2	9,3
10	1	2	5	2	0	1	2	0	5,6
11	2	292	25	0	4	44	63	0	7,9
12	1	6	7	0	2	1	2	0	8,8
13	2	31	110	2	4	12	28	0	9
14	1	5	6	0	2	1	1	0	6
15	5	8	8	0	6	1	2	0	19,4
15 b	2	5	5	2	2	1	2	0	6,8
16	4	18	154	0	43	3	15	1	13,3
16 b	5	40	79	16	12	9	26	0	10,9
17	9	48	235	14	15	30	49	2	10,5
18	2	6	7	1	3	1	2	0	7
18 b	3	26	20	5	6	3	10	0	9,4
19	1	7	6	0	2	1	2	0	7,2
20	3	110	10	3	5	18	16	0	8,3
21	3	31	24	8	9	2	13	0	7
22	26	57	84	27	17	16	37	0	9,3
23	2	5	6	3	4	1	1	0	8,5
24	8	248	84	2	17	50	45	0	7
25	2	74	27	1	7	11	15	0	5,4
26	2	26	121	0	6	12	28	2	8,2
27	2	28	88	11	3	11	22	2	6,9
28	1	9	6	1	2	1	2	0	5,2
29	3	86	113	0	6	17	45	0	18
30	2	396	27	3	11	62	71	3	6
31	9	46	44	64	13	8	24	16	9,2
31 b	2	27	195	0	15	22	30	1	17,3
32	2	6	7	1	3	1	2	0	4,5
33	2	15	17	0	5	2	5	0	15,9

El contenido de componentes mayoritarios (meq/L): es, en orden de abundancia aniones: SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> > HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> > Cl<sup>-</sup> > NO<sub>3</sub><sup>-</sup> y cationes: Mg<sup>2+</sup> > Ca<sup>2+</sup> > Na<sup>+</sup>. El contenido aniónico es reflejo, además de la interacción con los materiales atravesados, de la posible influencia de restos de escombreras, muy próximos a la red fluvial, cuyos lixiviados dan lugar a la incorporación de sulfatos al agua y descenso del pH.

La concentración de metales pesados en las aguas superficiales se encuentran en la mayoría de los casos por debajo de los límites máximos admisibles según el R.D 140/2003. No obstante, se han observado valores puntualmente elevados (por encima de 200  $\mu\text{g}/\text{L}$ ) de Fe (Boeza 260  $\mu\text{g}/\text{L}$ ) y Mn, por encima de 50  $\mu\text{g}/\text{L}$  (Sil 211  $\mu\text{g}/\text{L}$ , Boeza 251  $\mu\text{g}/\text{L}$ ), estos datos son, no obstante, normales incluso en condiciones no antropizadas, en aguas en contacto con pizarras. En el río Boeza la concentración de Ni ha sido de 38,6  $\mu\text{g}/\text{L}$  muy por encima de los 20  $\mu\text{g}/\text{L}$  que la legislación fija como límite. Por último se han medido 860  $\mu\text{g}/\text{L}$  de Al en el



río Sil. Ambos datos, a falta de un muestreo más exhaustivo deben ser considerados como valores puntuales sin mayor significado.

Tabla 3.- Datos de análisis de minoritarios y traza de las muestras.										
Punto	Al	As	Ba	Co	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn
	(µg/L)									
1	23	0	20	0	0	-	3,4	2,6	0	24,5
2	23,9	0	65	0	1,4	-	5,4	2,5	0	76,8
3	30,5	0	1,9	0	0	-	13,9	0	0	21,6
5	44,9	0	20	0	2,3	-	3,6	0	0	24,1
6	29,1	0	8,5	0	0	-	3,03	0	0	30,4
6 b	15,2	1,2	18	0	0	-	0,81	0	0	25
7	80,2	0	12	0	0	-	4,92	0	0	18,1
8	23,6	0	20	0	0	0	3,42	2,6	0	24,5
9	23,9	0	65	0	1,4	0	5,4	2,5	0	76,8
10	30,5	0	1,9	0	0	0	13,9	0	0	21,6
11	105	0	10	0,7	1,6	260	251	38,6		47,6
12	5,43	0	3,2	0	1	0	0,53	0	0	27,6
13	44,9	0	19,7	0	2,3	0	3,61	0	0	24,1
14	29,1	0	8,5	0	0	0	3,03	0	0	30,4
15	15,2	1,2	18	0	0	0	0,81	0	0	25
15 b	80,2	0	12	0	0	190	4,92	0	0	18,1
16	5,61	3,4	66	0	0,7	0	34,8	0	0	13,2
16 b	11,3	0	39,6	0	0	0	0	0	0	14,1
17	96,5	1,9	44,7	0,5	37	1900	31	2,78	0	35,6
18	162	1,4	15	1,6	12	4830	97,9	4,23	6	244
18 b	16	0	4,8	0	0	0	6,1	0	0	18,8
19	55	0	14,9	0	3,2	130	20,4	0	5	295
20	63	0	39,7	0	0,7	0	13,9	33,6	0	53,5
21	0	0	19,4	0	0	0	0	0	0	7,88
22	21,4	0	53,1	0	1,3	0	0,55	0	0	2,16
23	0	0	1,2	0	0	0	1,21	0	0	21,7
24	0	0	26,3	0	1,3	0	41,5	0	0	31,1
25	860	0	9,9	2,7	0,9	120	211	6,96	0	40,4
26	94,6	0,8	35,2	0	1,3	400	6,71	0	0	32,4
27	34,5	0	40,2	0	0	0	1,83	0	0	35,5
28	382	0	3,7	3,5	0	0	31,6	7,13	0	15,3
29	18,5	0	5,4	0	0	0	2,18	0	0	7,25
30	53	0,8	25,1	0	2,9	240	7,27	3,11	0	18,3
31	41,7	0,6	80,9	0	1,2	0	2,25	0	1,6	37,4
31 b	43,8	0,8	82,7	0	0,6	0	19,8	0	0	35,9
32	20,1	0	11,1	0	0	0	2,7	0	0	10,3
33	0	0	1,1	0	0	0	3,27	2,15	0	5,05

La Tabla 4 recoge los valores máximos de elementos traza, considerando todos los puntos muestreados, así como los límites de potabilidad establecidos para la legislación actual española.

Tabla 4.- Valores máximos de elementos traza de los puntos muestreados							
ELEMENTO	Al	As	Ba	Co	Cr	Cu	Fe
Máx. VALOR (µg/L)	860	3,41	82,7	3,52	20,6	37,4	4830
<i>R.D 140/2003 Valor paramétrico</i>	200	10		-	50	2000	200
ELEMENTO	Mn	Mo	Ni	Pb	Sb	U	Zn
Máx. VALOR (µg/L)	251	5,25	38,6	5,9	0,34	0,53	295
<i>R.D 140/2003 Valor paramétrico</i>	50	-	20	25	5	20	

Las aguas subterráneas tanto de fuentes y manantiales como de pozos muestran valores de pH más ácidos que las superficiales, muy variables, desde francamente ácidas 4,1 hasta ligeramente por encima de la neutralidad 7,5. No parece haber ninguna relación entre la naturaleza de la captación y el pH observado, en general los pH más bajos se sitúan en el área de Torre del Bierzo y se relacionan, como en el resto del área de estudio, con la litología dominante y los procesos de oxidación de sulfuros inducidos por la actividad minera.

Los valores de la conductividad eléctrica de las aguas subterráneas son en general, menores a los de las superficiales, situándose entre los 15 y 330  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , aunque puntualmente se han alcanzado 670  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en el punto 30, un pozo usado para riego en la zona de Fabero. El agua procedente de fuentes y manantiales suelen estar asociados a cortos recorridos desde su infiltración a su descarga. Se trata de áreas con una ZNS poco desarrollada, en la que además se han producido fenómenos de pérdida de suelo, como consecuencia el agua interacciona escasamente con el sustrato y las mineralizaciones son bajas.

Las durezas calculadas varían entre amplios límites, de 10 mg/L de  $\text{CaCO}_3$  a 436 mg/L de  $\text{CaCO}_3$ , observándose los valores más altos en aguas que atraviesan materiales terciarios y cuaternarios, mineralización y dureza están directamente relacionadas como corresponde a zonas en las que existe una gran uniformidad en el origen de la fácies catiónica.

El contenido (meq/L) de componentes mayoritarios en las aguas subterráneas es, en orden decreciente: aniones:  $\text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^-$  y cationes:  $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+$ .

La presencia de nitratos no es significativa, se observan concentraciones por debajo de los límites admisibles (50 mg/L) en todos los puntos salvo en el 30, con 64 mg/L. La presencia de nitratos y valores elevados de potasio podrían ser explicados por la utilización de abonos nitrogenados potásicos.

Se han encontrado puntualmente concentraciones elevadas de metales pesados en algunos de los puntos de aguas subterráneas muestreados. Las concentraciones más elevadas de Fe, por encima de 200  $\mu\text{g}/\text{L}$  se han localizado en 4 puntos, principalmente pozos, aunque el valor más elevado lo muestra la fuente de Torre del Bierzo (4830  $\mu\text{g}/\text{L}$ ). En este punto también se han encontrado valores de Mn elevados próximos a 98  $\mu\text{g}/\text{L}$ . El valor admisible de Ni (20  $\mu\text{g}/\text{L}$ ) únicamente se ha superado (33,6  $\mu\text{g}/\text{L}$ ) en el punto 20 una fuente en la zona de Torre del Bierzo, y el Zn, ha alcanzado valores de casi 300  $\mu\text{g}/\text{L}$  en dos muestras, puntos 18 y 19, ambos en la zona de Torre del Bierzo.

Cabe mencionar la presencia de elementos trazas como el As, Pb y Cr en concentraciones bajas en 3 puntos: 2 pozos y en la fuente de Torre del Bierzo. En el resto de puntos considerados, estos elementos se encuentran por debajo del límite de detección.

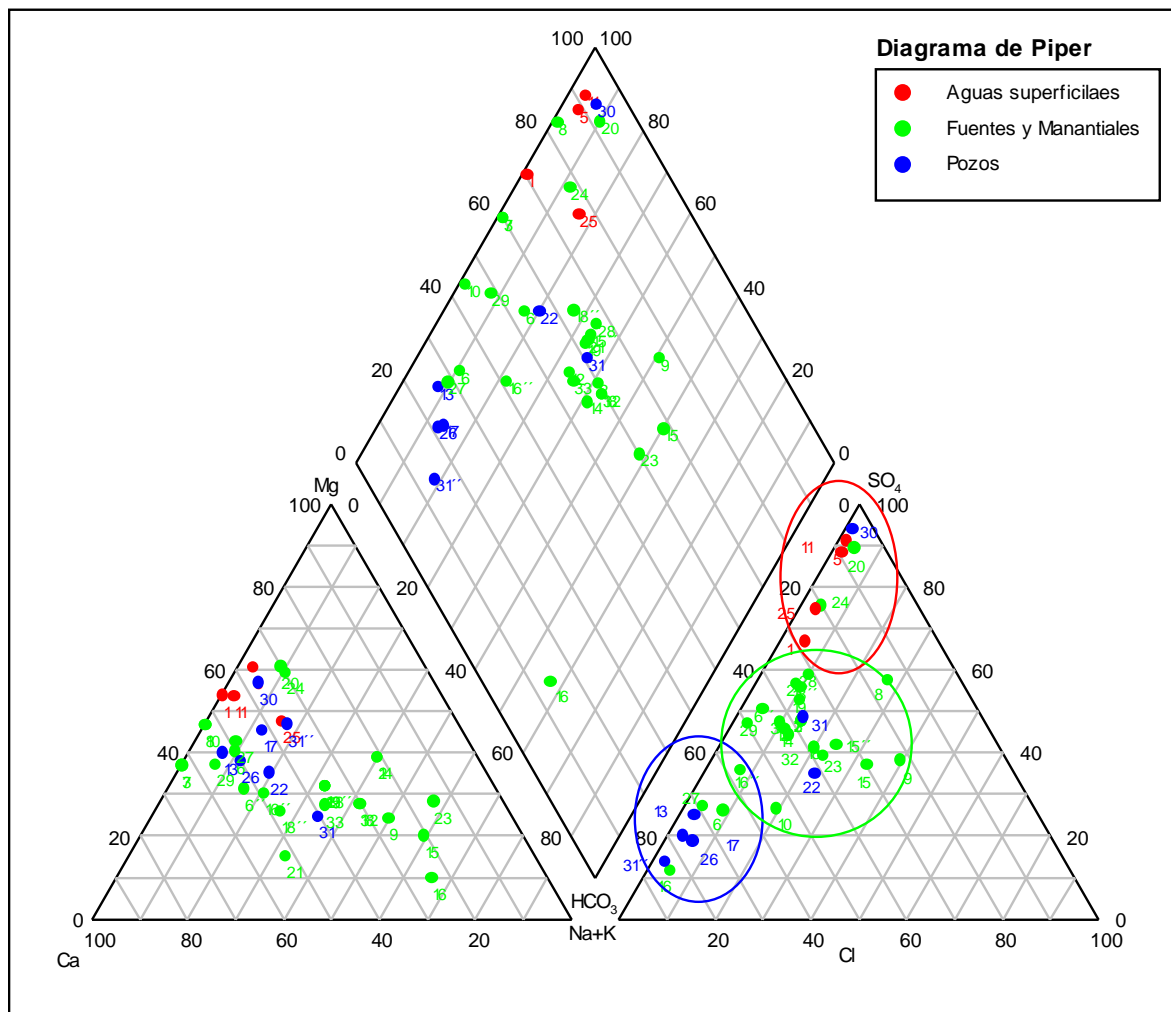


Figura 2 .- Diagrama de Piper de las aguas superficiales y subterráneas de la zona de estudio. INAQUAS

La facies predominante (Figura 2) en las aguas superficiales es de tipo sulfatada magnésico-cálcica. Las aguas sulfatadas pueden responder a fenómenos locales de mineralización, como la presencia de sulfuros metálicos. Se ha llevado a cabo la representación de las facies hidroquímicas mediante diagramas de Stiff con el fin de definir su distribución espacial dentro de la zona de estudio (Figura 3). Los diagramas aparecen a 3 escalas diferentes dependiendo de la concentración de los iones. Se han diferenciado claramente 5 tipos de facies en la zona, predominado las especies sulfatadas sobre las bicarbonatadas. En las aguas subterráneas hay mayor variabilidad: las fuentes y manantiales presentan facies sulfatadas cálcico-magnésicas principalmente y, bicarbonatos cálcicas y sulfatadas sódicas en menor medida.

- *Facies sulfatada cálcica*: es la facies dominante junto con la sulfatada magnésica. Los puntos que presentan este tipo de aguas se localizan principalmente en fuentes y manantiales localizados sobre materiales paleozoicos que aparecen en zonas topográficamente más elevadas y materiales terciarios.

- *Facies sulfatada magnésica*: es representativa de los puntos de aguas superficiales, aparece tanto en materiales paleozoicos, como terciarios y cuaternarios.



- *Facies sulfatada sódica*: al igual que en caso anterior se observa tanto en materiales paleozoicos como terciarios.

- *Facies bicarbonatadas cálcicas*: dentro de las facies bicarbonatadas representadas en la zona, éstas son las más abundantes. Suelen presentarse en puntos localizados tanto en pozos como en manantiales, sobre materiales paleozoicos y terciarios.

- *Facies bicarbonatadas magnésicas*: este tipo de facies es minoritario en la zona, únicamente aparece representada en 3 puntos de muestreo: dos de los cuales son un pozo (n° 17) y un manantial (n° 16) que están muy próximos entre sí y situados sobre materiales terciarios. El otro punto (n° 31) es un pozo alejado de los puntos anteriormente mencionados.

### Índices hidroquímicos

#### *Índices d'Amore*

Punto	ÍNDICES D'AMORE					
	A	B	C	D	E	F
1	-39.8	67.7	-4.4	-52.4	72.1	47.6
2	-10.3	8.9	26.5	2.2	22.1	-16.9
3	-10.3	48.6	-13.2	-35.5	61.8	64.5
5	-79.7	86.3	1.7	-56.2	87.5	35.0
6	38.3	17.7	1.8	-29.6	25.3	42.2
6 b	-6.7	35.7	12.1	-14.1	39.4	38.6
7	-10.3	48.6	-13.2	-35.5	61.8	64.5
8	-43.0	58.3	-26.3	-45.2	84.7	54.8
9	-16.7	-3.2	3.8	19.4	28.2	-21.7
10	26.6	27.4	-18.6	-45.2	46.0	54.8
11	-86.6	90.4	1.6	-49.7	91.2	42.8
12	-3.8	14.3	21.8	1.8	24.8	4.8
13	46.2	19.0	4.5	-31.8	21.2	47.8
14	-2.5	5.4	27.5	2.2	17.7	-16.9
15	-8.1	-20.9	26.8	40.3	11.2	-36.4
15 b	-9.1	10.6	9.1	1.8	33.9	4.8
16	71.4	-52.2	60.9	56.2	-49.4	-39.7
16 b	20.4	16.3	14.2	-8.5	22.5	30.3
17	55.9	8.0	6.6	-32.3	12.0	31.0
18	-3.4	0.4	22.7	15.4	19.5	-9.8
18 b	-22.4	30.8	17.1	1.4	39.7	23.6
19	-17.4	21.2	22.0	1.8	31.5	4.8
20	-83.8	81.5	5.4	-50.6	84.8	23.3
21	-22.4	25.0	25.0	18.8	32.5	21.3
22	5.8	17.0	-3.3	-14.8	39.3	28.4
23	-2.2	-16.6	35.0	30.3	5.2	-40.5
24	-56.0	65.9	7.1	-47.5	69.2	21.2
25	-53.8	60.0	12.8	-30.7	62.8	22.7
26	55.9	11.3	7.5	-26.9	11.6	40.2
27	41.3	22.0	3.3	-35.5	22.4	41.9
28	-28.4	27.4	23.3	1.8	36.3	4.8
29	1.7	41.4	4.4	-29.1	43.6	50.8
30	-89.2	89.1	4.6	-50.2	88.9	32.5
31	-12.2	29.6	6.8	-3.3	28.3	7.9
31 b	69.0	-1.6	14.9	-29.0	-0.8	20.6
32	-3.4	0.4	22.7	15.4	19.5	-9.8
33	-5.2	13.8	25.7	8.4	22.5	5.1

Los índices de D'Amore (Tabla 5), confirman lo observado en el análisis de facies hidroquímicas, las aguas subterráneas presentan valores del índice A casi siempre fuertemente positivos, en correspondencia con aguas bicarbonatadas desarrolladas sobre materiales terciarios. Los puntos 22 y 31 son aguas de transición, con contenidos cada vez más elevados de sulfato. El punto 30 se asemeja ya claramente a las aguas de las aguas superficiales, siendo claramente sulfatada. El índice E puede interpretarse de manera similar al A pero claro está cambiando el signo. La mayor proporción de sulfatos y magnesio de las aguas superficiales

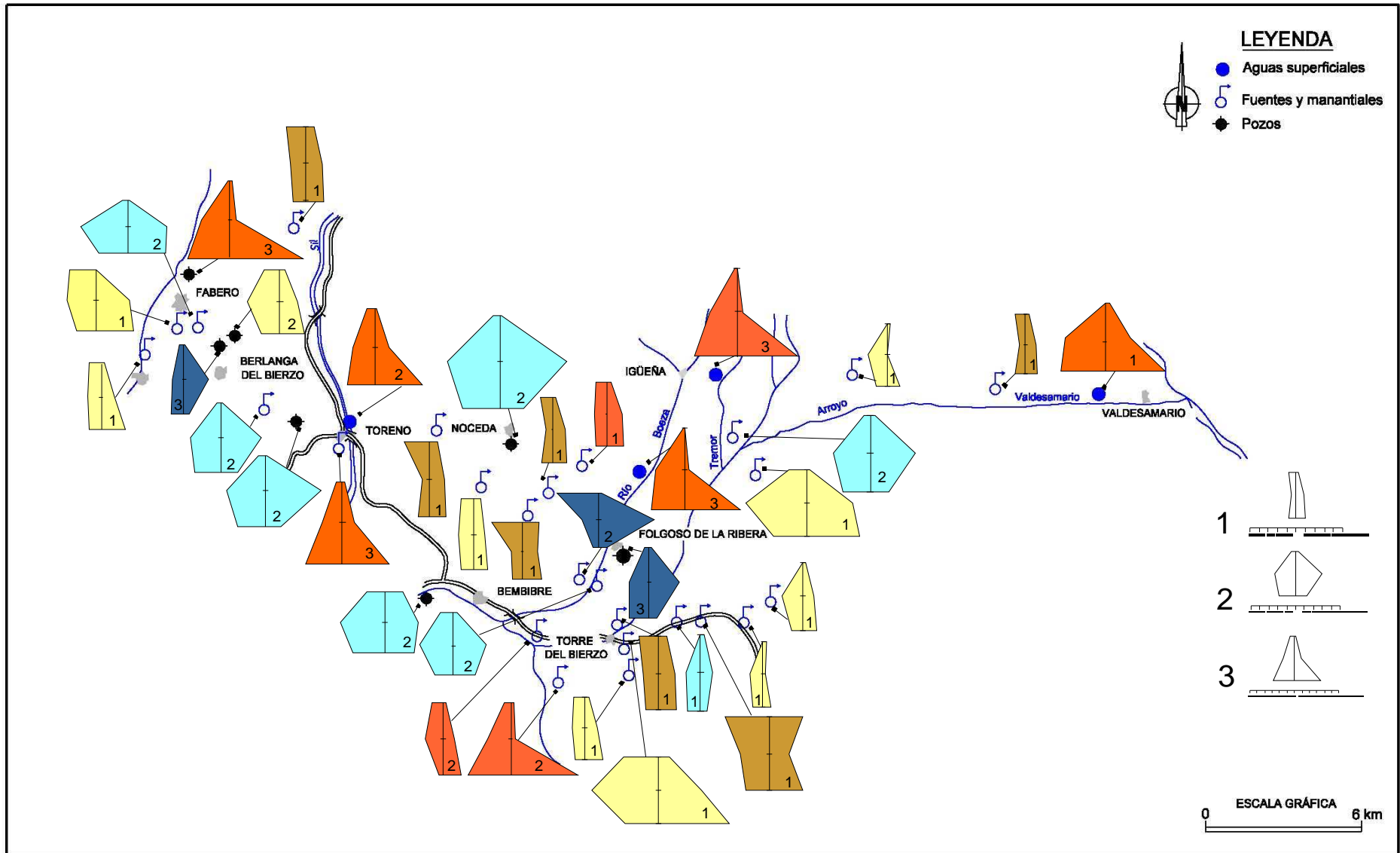


Figura 3.- Distribución espacial de los diagramas de Stiff de aguas superficiales y subterráneas de la zona de estudio

hace que en general los valores calculados del índice D sean mas negativos, se observa que las aguas superficiales y las captadas en pozos muestran un D siempre negativo, mientras que los manantiales presentan un recorrido muy amplio, desde -50 a +56. La naturaleza sulfatada, con escaso contenido en sodio de las aguas superficiales, permite diferenciarlas pues muestran todas un valor del índice B por encima de 60, sin embargo tanto las agua procedentes de pozos como las captadas en manantiales muestran una gran variabilidad en este índice, mostrando incluso valores fuertemente negativos aquellas de carácter sódico como el caso del punto 30. No se observan fenómenos de intercambio de potasio con las posiciones de cambio del terreno (índice F).

### Índices agrícolas

Al ser el principal uso de las aguas analizadas el riego de pequeñas huertas se ha estimado conveniente determinar su calidad mediante el índice SAR (U.S Salinity Laboratory Staff, 1954) y la clasificación propuesta por Riverside, (Cánovas, 1986).

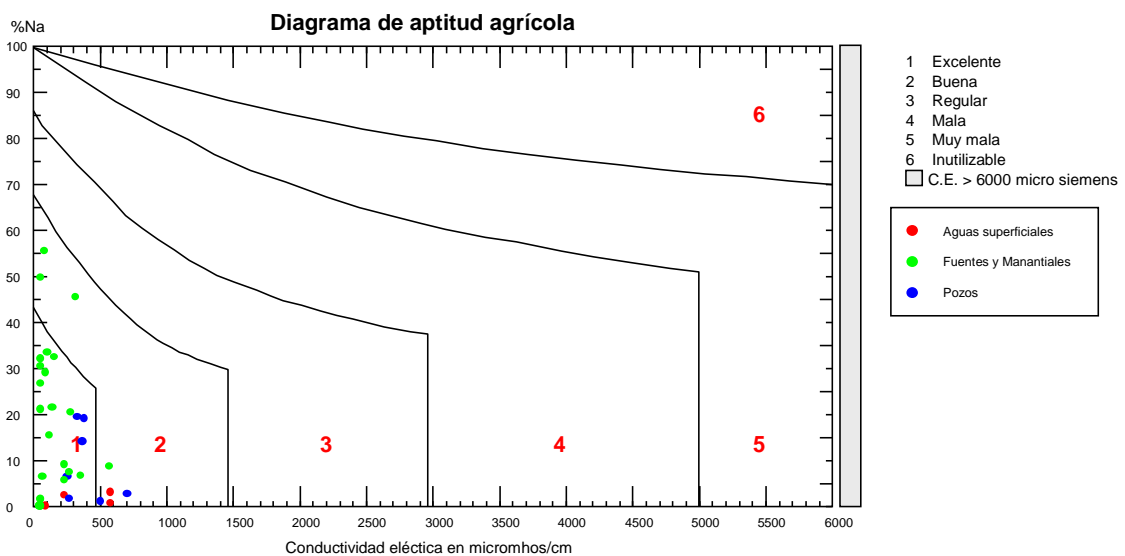


Figura 4.- Diagrama de aptitud agrícola. INAQUAS

Según el valor del índice SAR se trata de aguas excelentes o buenas, se sitúan siempre dentro del grupo C1/C2-S1 (bajo riesgo de salinización y alcalinización). Son aguas de baja salinidad, con conductividades entre 16 y 670  $\mu\text{S}/\text{cm}$  que corresponde a valores de sólidos disueltos de 11,4 y 2233 mg/L. El contenido en sodio también es bajo, salvo en un punto que presenta 43 mg/l, siempre menor de 17 mg/l. Según el criterio de L.V Wilcox (Cánovas, 1986), son todas clasificables dentro del los grupos de excelentes a buenas. Por último, tanto el índice de carbono residual como el coeficiente alcalimétrico de Scott (Cánovas, 1986) consideran estas aguas como recomendables y buenas para uso agrícola.

## Resumen estadístico de los datos

En la tabla 6 se presentan los valores mínimos, máximos, medios y la desviación estándar de los 37 análisis realizados.

Parámetro (*)	Aguas subterráneas								Aguas superficiales			
	Fuentes y manantiales				Pozos				Min	Max	Media	D.E
	Min	Max	Media	D.E	Min	Max	Media	D.E				
pH	4,1	7,4	5,07	4,77	6,1	7,5	6,5	6,5	6,2	7,1	6,4	6,6
C.E(μS/cm)	15	535	109,2	128,9	231	670	371,7	155	66	555	342,5	247,1
Ca (mg/l)	1	45	10	12,8	24	71	38,14	16,7	6	63	35	28,67
Mg (mg/l)	1	50	5,57	10,35	8	62	23,14	18,6	4	53	28	24,12
Na (mg/l)	0	43	5,73	8,52	4	17	11,57	4,9	0	7	4	2,94
Cl (mg/l)	1	8	2,72	2,15	2	26	7,42	8,8	1	3	2	0,81
HCO <sub>3</sub> (mg/l)	0	154	30,04	42,1	27	235	116,6	75,9	11	41	26	12,27
SO <sub>4</sub> (mg/l)	2	248	28,4	51,54	26	396	90,1	135	21	302	172,2	145,7
Al (μg/l)	0	382	48,1	79,3	21	96,5	56,5	28,3	23	860	258,3	402,5
As (μg/l)	0	3,41	0,29	0,77	0	1,96	0,81	0,63	0	0	0	0
Ba (μg/l)	0	70	20	21,9	20	80	48,6	23,4	0	20	6,67	11,5
Cr (μg/l)	0	0	0	0	0	20,6	3,43	8,4	0	0	0	0
Cu (μg/l)	0	12	0,87	2,44	0,58	37,4	6,71	13,5	0	2,31	1,2	0,99
Fe (μg/l)	0	4830	367,8	21,9	0	1900	362,8	696	120	260	190	98,9
K (mg/l)	0	2	0,21	0,6	0	16	3,4	5,6	0	0	0	0
Mn (μg/l)	0	10	12,3	22,7	0	30	10	11,5	0	250	122,5	125,8
Ni (μg/l)	0	33,6	2,77	7,71	0	3,11	0,84	1,44	0	38,6	12,05	148
Pb (μg/l)	0	5,9	0,45	1,54	0	1,59	0,39	0,79	0	0	0	0
Zn (μg/l)	5	295	44,94	68,9	2,16	37,4	26,5	12,8	24,1	47,6	11,7	34,4

(\*) Ag, Be, Th, Tl, Cd, Se, Hg: todos sus valores se encuentran por debajo del límite de detección.  
D.E = desviación estándar.

A grandes rasgos podemos decir que no se han observado diferencias muy significativas entre las aguas superficiales y subterráneas. Puntualmente la desviación estándar muestra valores notables de desviación con respecto a su media.

La mayor variabilidad se han encontrado en la conductividad eléctrica, hay que considerar que se están analizando conjuntamente aguas de bajo y largo tiempo de residencia y esto hace que el rango de variación se amplíe notablemente. Los bicarbonatos y sulfatos que son claros indicadores del origen del agua también se muestran muy variables. No obstante es entre los metales pesados donde se observa mayor variabilidad, especialmente en el aluminio, hierro, manganeso, níquel y zinc, señal a su vez de que la concentración de estos elementos en los materiales acuíferos es muy dispar así como los procesos de movilización.

En general, se ha observado mayor dispersión en las aguas superficiales, que se ven mas afectadas por la mezcla en diversas proporciones de aguas de precipitación reciente y de aguas subterráneas.

Estas diferencias se observan de forma más clara en los diagramas de cajas realizados para los elementos mayoritarios (Figura 5) y metales pesados (Figura 6).

Como se comentó mas arriba, se observa mayor variabilidad en el caso de bicarbonatos y sulfatos, en el resto de los elementos (Ca, Mg, Na y Cl), la variabilidad es menor y su distribución es más o menos similar tanto en aguas superficiales como subterráneas. El comportamiento de los nitratos es diferente, siendo similares las relaciones en ríos y manantiales, y obteniéndose valores con más variabilidad en pozos.

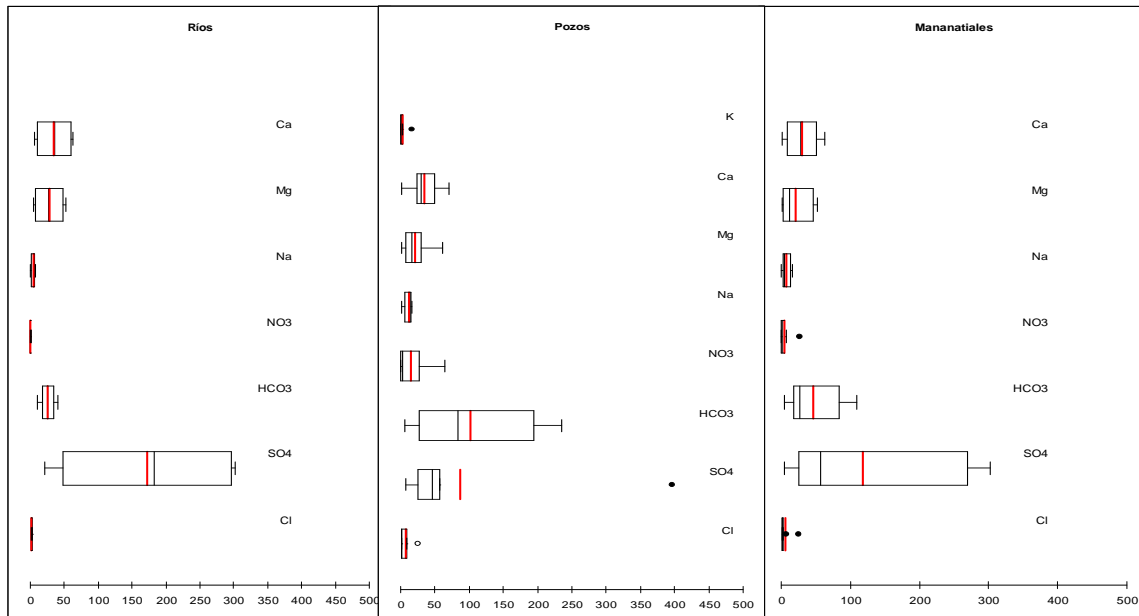


Figura 5.- Diagrama de cajas de elementos mayoritarios.

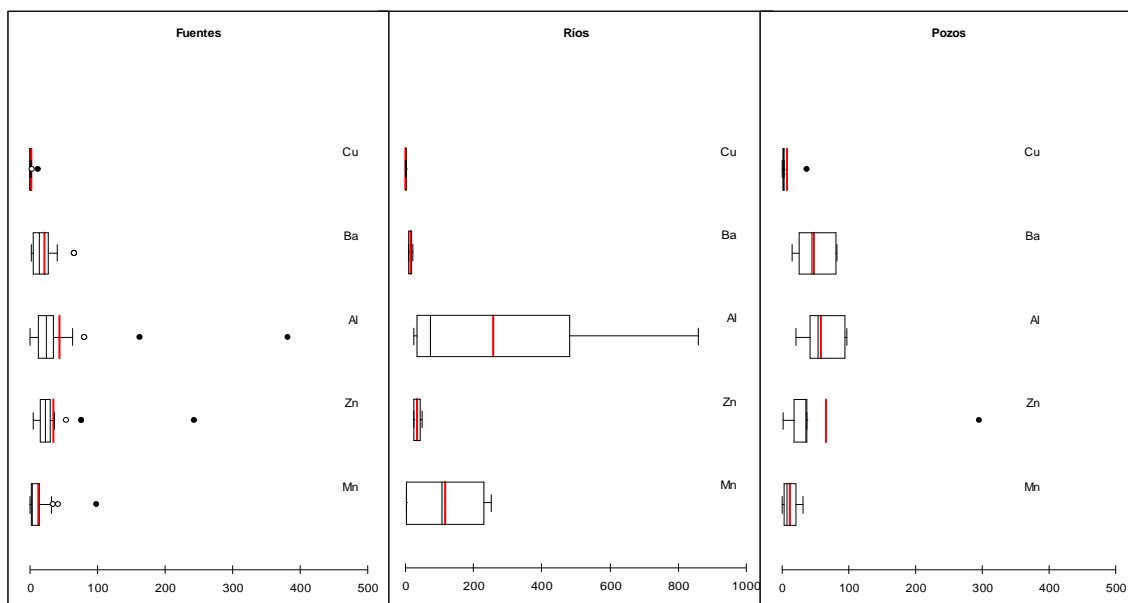


Figura 6.- Diagrama de cajas de metales pesados.

Por otro lado, los metales pesados suelen mostrar un comportamiento muy diferente. En el caso de las aguas subterráneas, la variabilidad y dispersión de los datos es bastante similar, aunque los datos tomados de Al, Zn y Mn en las fuentes, presentan numerosos valores extremos. En las aguas superficiales la mayor variabilidad se observa en los contenidos de Al y Mn, destaca el Al, donde se han obtenido valores máximos de hasta 860 µg/L.

## Análisis estadístico multivariante

Con objeto buscar un patrón en la distribución de analitos y su relación con la procedencia del agua, superficial o subterránea, se ha realizado un análisis de correlación, de componentes principales y de agrupamiento. La herramienta empleada ha sido XLSTAT 7.5.2 para Excel.

### Análisis de correlación

En la Tabla 7, se muestran los coeficientes de correlación de Pearson. Los valores que aparecen en negrita, son valores significativos al umbral  $\alpha = 0.05$  (prueba bilateral).

	Cl	SO4	HCO3	NO3	Na	Mg	Ca	K	pH	C.E.	P2O5	SiO2	Mn	Cu	Zn	Cr	Pb	As	Al	Ba	Co	Mo	Ni	Sb	U	V	Zn	
Cl	1.000																											
SO4	0.081	1.000																										
HCO3	0.320	0.064	1.000																									
NO3	<b>0.562</b>	-0.036	0.130	1.000																								
Na	<b>0.441</b>	0.166	<b>0.623</b>	0.247	1.000																							
Mg	0.186	<b>0.946</b>	<b>0.338</b>	-0.003	0.253	1.000																						
Ca	0.317	<b>0.837</b>	<b>0.532</b>	0.150	<b>0.352</b>	<b>0.922</b>	1.000																					
K	0.223	0.064	0.124	<b>0.862</b>	0.222	0.077	0.171	1.000																				
pH	0.171	<b>0.337</b>	<b>0.632</b>	0.024	<b>0.512</b>	<b>0.458</b>	<b>0.570</b>	0.147	1.000																			
C.E.	<b>0.353</b>	<b>0.848</b>	<b>0.552</b>	0.192	<b>0.490</b>	<b>0.936</b>	<b>0.975</b>	0.224	<b>0.594</b>	1.000																		
P2O5	0.316	0.038	<b>0.570</b>	0.293	0.240	0.243	<b>0.344</b>	0.216	0.233	<b>0.348</b>	1.000																	
SiO2	0.184	-0.093	<b>0.465</b>	-0.007	<b>0.359</b>	0.012	0.162	0.018	<b>0.373</b>	0.159	0.067	1.000																
Mn	-0.088	<b>0.339</b>	-0.031	-0.137	0.038	0.274	0.265	-0.090	0.221	0.278	-0.008	-0.166	1.000															
Cu	0.203	0.040	<b>0.503</b>	0.119	0.170	0.232	0.284	0.084	0.176	0.287	<b>0.926</b>	0.022	0.119	1.000														
Zn	-0.134	-0.104	-0.173	-0.083	-0.161	-0.126	-0.195	-0.019	-0.202	-0.191	-0.042	-0.141	0.209	0.223	1.000													
Cr	0.208	-0.014	<b>0.548</b>	0.132	0.180	0.195	0.266	0.076	0.185	0.268	<b>0.976</b>	0.070	0.025	<b>0.945</b>	-0.014	1.000												
Pb	-0.063	-0.127	-0.163	0.085	-0.097	-0.159	-0.184	0.127	-0.158	-0.183	-0.038	-0.115	0.160	0.221	<b>0.928</b>	-0.045	1.000											
As	-0.054	-0.054	0.240	-0.071	0.019	0.009	0.091	0.084	0.313	0.062	0.037	-0.018	-0.049	0.003	-0.019	-0.010	-0.038	1.000										
Al	-0.110	0.033	-0.071	-0.083	-0.072	0.001	-0.028	-0.045	0.210	0.002	0.013	-0.262	<b>0.645</b>	0.066	0.087	0.030	0.062	0.025	1.000									
Ba	<b>0.422</b>	-0.006	<b>0.495</b>	<b>0.524</b>	<b>0.580</b>	0.128	0.210	<b>0.521</b>	0.194	0.314	0.236	0.238	-0.133	0.153	0.027	0.144	-0.018	0.093	-0.155	1.000								
Co	-0.111	-0.013	-0.107	-0.096	-0.087	-0.048	-0.080	-0.082	0.146	-0.062	0.034	-0.251	<b>0.555</b>	0.139	0.148	0.062	0.179	-0.053	<b>0.838</b>	-0.208	1.000							
Mo	0.208	-0.014	<b>0.548</b>	0.132	0.180	0.195	0.266	0.076	0.185	0.268	<b>0.976</b>	0.070	0.025	<b>0.945</b>	-0.014	<b>1.000</b>	-0.045	-0.010	0.030	0.144	0.062	1.000						
Ni	-0.084	<b>0.391</b>	-0.151	-0.104	-0.093	0.302	0.262	-0.082	-0.028	0.275	-0.027	-0.110	<b>0.619</b>	0.026	0.078	-0.003	-0.031	-0.065	0.194	-0.029	0.231	-0.003	1.000					
Sb	0.208	-0.014	<b>0.548</b>	0.132	0.180	0.195	0.266	0.076	0.185	0.268	<b>0.976</b>	0.070	0.025	<b>0.945</b>	-0.014	<b>1.000</b>	-0.045	-0.010	0.030	0.144	0.062	<b>1.000</b>	-0.003	1.000				
U	0.134	-0.064	<b>0.532</b>	0.061	0.123	0.135	0.222	0.084	0.258	0.208	<b>0.832</b>	0.017	0.074	<b>0.889</b>	0.169	<b>0.836</b>	0.180	<b>0.439</b>	0.072	0.135	0.124	<b>0.836</b>	-0.022	<b>0.836</b>	1.000			
V	0.202	-0.038	<b>0.631</b>	0.097	<b>0.461</b>	0.151	0.240	0.077	0.277	0.285	<b>0.900</b>	0.139	0.037	<b>0.874</b>	-0.042	<b>0.929</b>	-0.059	-0.007	0.001	0.247	0.038	<b>0.929</b>	-0.025	<b>0.929</b>	<b>0.768</b>	1.000		
Zn	-0.134	-0.104	-0.173	-0.083	-0.161	-0.126	-0.195	-0.019	-0.202	-0.191	-0.042	-0.141	0.209	0.223	<b>1.000</b>	-0.014	<b>0.928</b>	-0.019	0.087	0.027	0.148	-0.014	0.078	-0.014	0.169	-0.042	1.000	

Tabla 7.- Coeficientes de correlación de Pearson para los distintos parámetros analizados

Como era de esperar, los sulfatos presentan una fuerte correlación con el Mg, Ca que son los cationes más abundantes en el material original, y al ser la fuente principal de la mineralización del agua, con la conductividad eléctrica. Los bicarbonatos presentan una correlación mayor con el Na, pH y V, aunque también muestran correlación positiva algo menor con Ca, conductividad eléctrica, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, SiO<sub>2</sub>, Cu, Cr, Ba, Mo, Sb y U. Los cloruros presentan cierta correlación con los nitratos, Na y Ba. Los nitratos se correlacionan con el K probablemente por su origen común en los abonos nitrogenados y en menor grado con el Ba. Los fosfatos tienen una correlación muy alta con el Cu, Cr, Mo, Sb, U, y V.

Se han observado fuertes correlaciones entre metales pesados como: Zn y Pb. El Mn se ha correlacionado bien con Al, Ni y Co. Otros elementos como el Cu ha presentado gran afinidad con el Cr, Mo, Sb, U y V. Del mismo modo, el Cr se ha correlacionado de manera perfecta con el Mo y Sb y algo menor con el U y V. El Mo, U y V se correlacionan bastante bien entre ellos, siendo perfecta la correlación entre Mo y Sb.

### Análisis de componentes principales

El análisis de componentes principales se ha realizado sobre todas las variables medidas. La determinación de los factores se ha realizado mediante el método de componentes principales con rotación "varimax" de los ejes. Este procedimiento hace que la distribución de los factores de carga y la varianza explicada por cada factor, sea más homogéneas. Los resultados



se muestran en la Tabla 8. Esta recoge los factores extraídos en el análisis factorial, exponiendo además la varianza acumulada. Se han considerado representativos aquellos factores cuyo valor propio es superior a 2, por lo que se han seleccionado 4 factores, los cuales explican el 68 % de la varianza total. El resto de factores se ha despreciados por explicar un porcentaje poco significativo de la varianza total.

CP	VP	% VE	% VA	CP	VP	% VE	% VA
1	8.109	30.033	30.033	12	0.341	1.262	97.2331
2	4.371	16.189	46.222	13	0.254	0.940	98.170
3	3.628	13.435	59.657	14	0.195	0.723	98.894
4	2.383	8.824	68.482	15	0.146	0.541	99.434
5	1.817	6.728	75.210	16	0.075	0.279	99.713
6	1.728	6.401	81.611	17	0.036	0.133	99.846
7	1.278	4.732	86.343	18	0.026	0.097	99.942
8	0.820	3.037	89.380	19	0.008	0.028	99.970
9	0.752	2.784	92.164	20	0.004	0.014	99.984
10	0.626	2.318	94.482	21	0.003	0.011	99.995
11	0.401	1.486	95.968	22	0.001	0.004	99.999

CP= componente principal; VP= valor propio; VE= varianza explicada; VA= varianza acumulada

Variable	FACTOR			
	1	2	3	4
Cl	0.163	0.121	-0.510	-0.075
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	-0.096	0.894	0.017	-0.016
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.583	0.263	-0.407	-0.261
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.045	0.001	-0.706	0.109
Na	0.195	0.262	-0.506	-0.208
Mg	0.147	0.901	-0.097	-0.080
Ca	0.228	0.877	-0.254	-0.141
K	0.006	0.069	-0.633	0.140
pH	0.237	0.481	-0.186	-0.182
C.E	0.223	0.906	-0.334	0.133
SiO <sub>2</sub>	0.089	-0.048	-0.266	-0.300
Mn	0.003	0.559	0.384	0.386
Zn	-0.002	-0.133	0.016	0.803
Al	0.036	0.217	0.384	0.284
Ba	0.132	0.132	-0.794	-0.040
Cu	0.951	0.091	-0.052	0.277
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.944	0.112	-0.186	0.004
Cr	0.984	0.058	-0.033	-0.006
Pb	-0.030	-0.181	-0.123	0.913
As	0.072	0.031	-0.051	-0.038
Co	0.074	0.149	0.418	0.369
Mo	0.984	0.058	-0.033	-0.006
Ni	-0.066	0.466	0.279	0.160
Sb	0.984	0.058	-0.033	-0.006
U	0.870	0.038	-0.040	0.220
V	0.927	0.063	-0.123	-0.065
Fe	0.389	-0.014	0.050	0.677

El análisis factorial se presenta en la tabla 9, el primer factor que representa aproximadamente el 30% de la variabilidad total del sistema, estaría relacionado con los contenidos en bicarbonatos, fosfatos, Cu, Cr, Mo, Sb, U y V. De manera menos importante, los contenidos en sílice, Cl, Ba y As también influyen. El segundo factor supone el 16% de la variabilidad de las aguas, donde se agrupan sulfatos, Mg, Ca, pH, C.E, Mn, Ni y Na. El tercer factor con un 13%, incluiría únicamente Al y Co. El cuarto y último factor considerado representa el 8% y agrupa Zn, Pb y Fe principalmente, aunque estarían relacionados con nitratos y K de manera poco significativa.

La Figura 7 muestra la representación mediante ACP de las variables analizadas, observándose los cuatro grupos mencionados anteriormente.

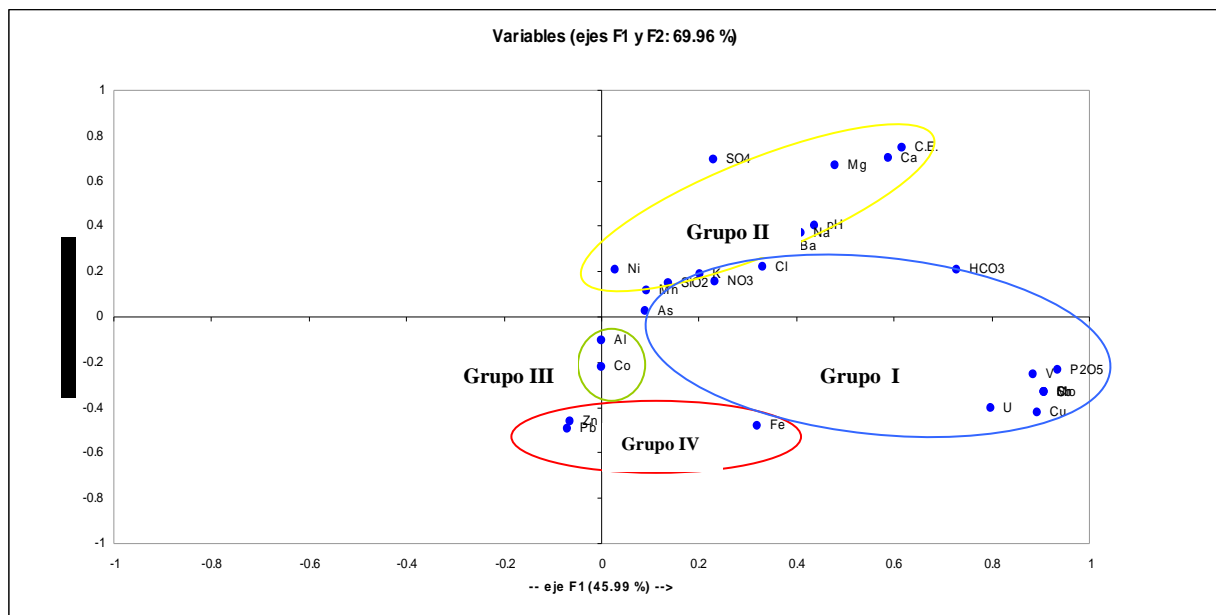


Figura 7.- Representación mediante Análisis de Componentes Principales de las variables analizadas.

### Análisis cluster

Se ha llevado a cabo también un análisis de agrupamiento utilizando el método de Ward y la distancia euclídea. El agrupamiento principal de las variables (Figura 8) permite observar la existencia de 2 grupos en líneas generales:

- GRUPO 1: dividido a su vez en tres sub-grupos; el primero representado por U, Cu, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, Cr, Mo Sb, y V; el segundo por HCO<sub>3</sub>, pH, Na, Ba y SO<sub>4</sub>, Mg, Ca y C.E. El tercer grupo estaría representado por Cl, NO<sub>3</sub> y K. Dentro de este grupo 1, estarían As y SiO<sub>2</sub>.
- GRUPO 2: estaría formado por Al, Co, Mn, Ni Zn, Pb y Fe.

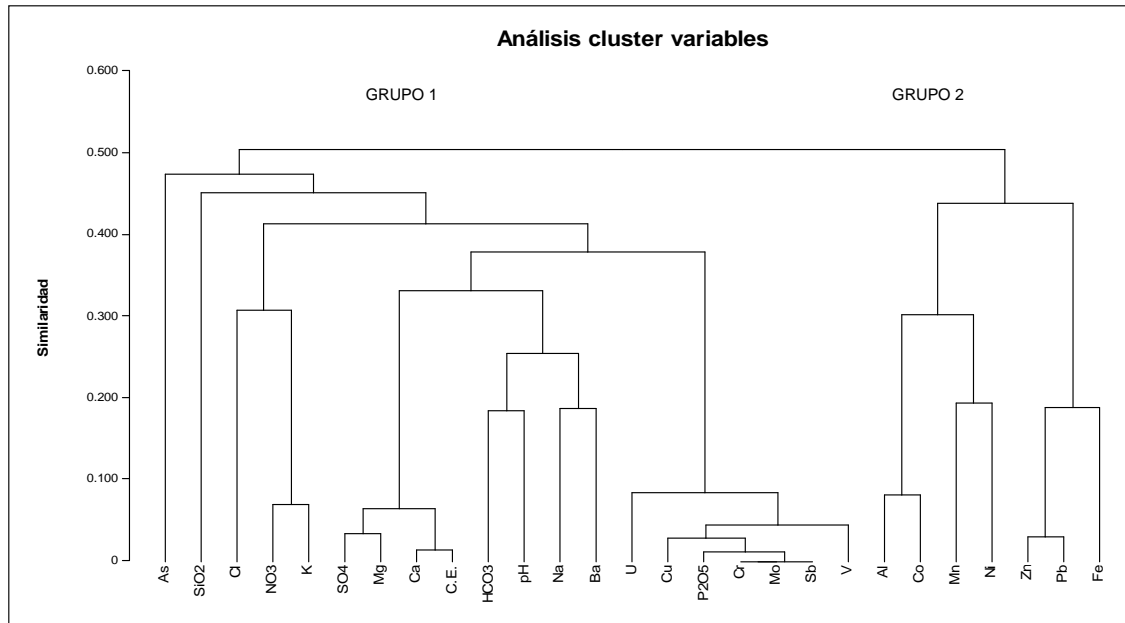


Figura 8.- Análisis cluster de todas las variables consideradas.

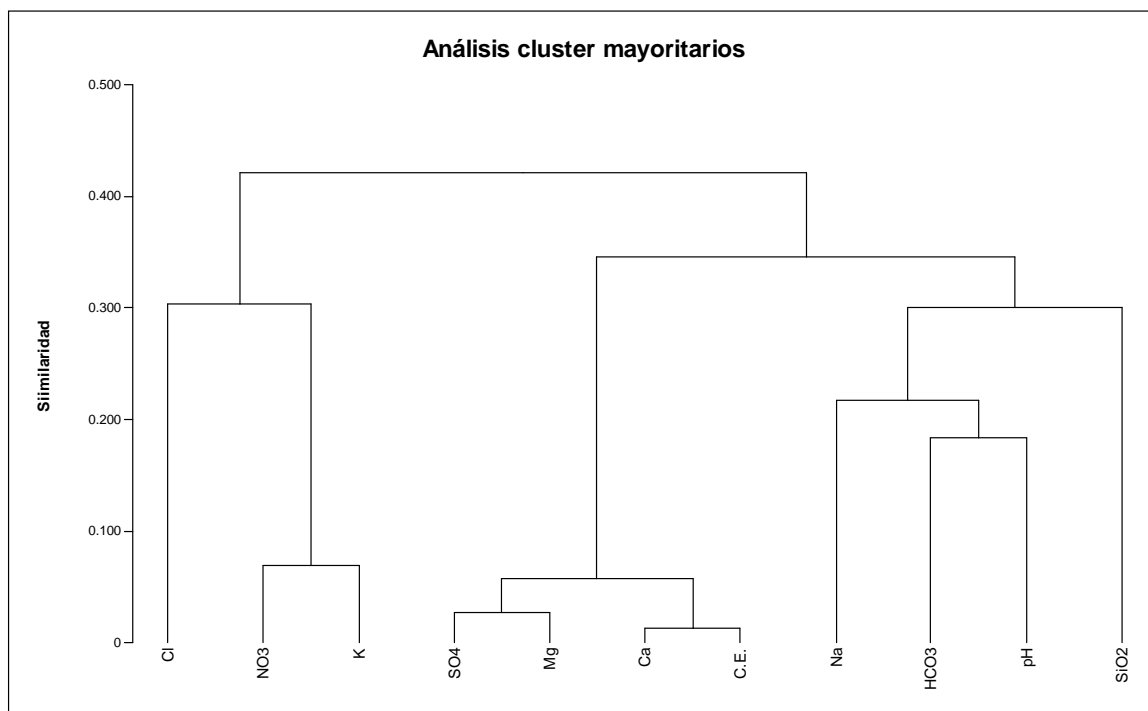


Figura 9.- Análisis cluster de elementos mayoritarios de las variables

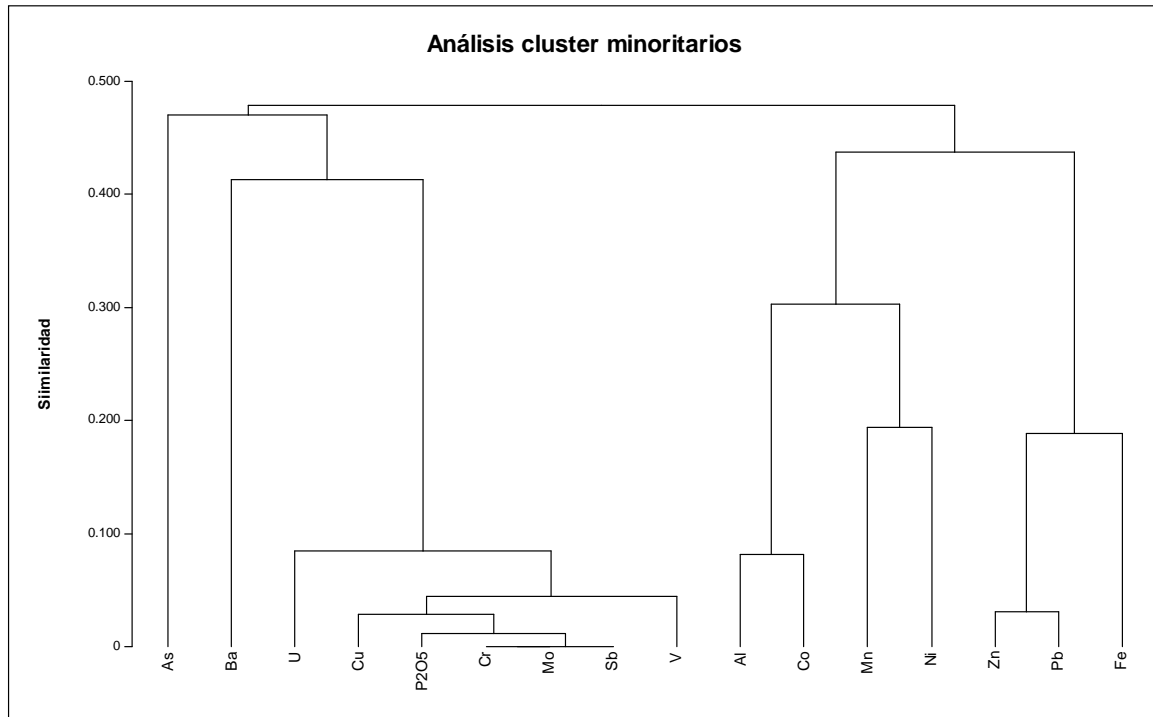


Figura 10.- Análisis cluster de elementos minoritarios de las variables

Se ha llevado a cabo un análisis cluster de las variables separando los elementos mayoritarios (Figura 9) y minoritarios (Figura 10). Los elementos mayoritarios se disponen en 3 grupos:

- 1) Cl, NO<sub>3</sub> y K, en general pueden representar, principalmente, acción antrópica debido al abonado que aporta cantidades notables de nitrógeno y potasio. El fósforo, fácilmente inmovilizado en el suelo no se encuentra en este grupo.
- 2) SO<sub>4</sub>, Mg, Ca y C.E, corresponde a parámetros que definen la mayor parte de la mineralización total del agua.
- 3) Na, HCO<sub>3</sub>, pH y SiO<sub>2</sub>.

Por otra parte, los elementos minoritarios se disponen en 2 grandes grupos:

- 1) Al, Co, Mn, Ni, Zn, Pb y Fe, en este grupo se sitúan los metales más abundantes, en especial Fe y Mn que están generalmente asociados.
- 2) U, Cu, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, Cr, Mo, Sb y V. El Ba y el As presentan mayor similitud con las variables de este grupo.

Por otra parte, se han representado el análisis cluster de las observaciones (Figura 11). Se han definido 2 grandes grupos, aunque no se ha observado una clara relación entre los puntos que pertenecen a distintas litología (Paleozoico, Terciario o Cuaternario), y tampoco se ha encontrado relaciones de similaridad entre los distintos puntos de agua (pozos, manantiales y fuentes).

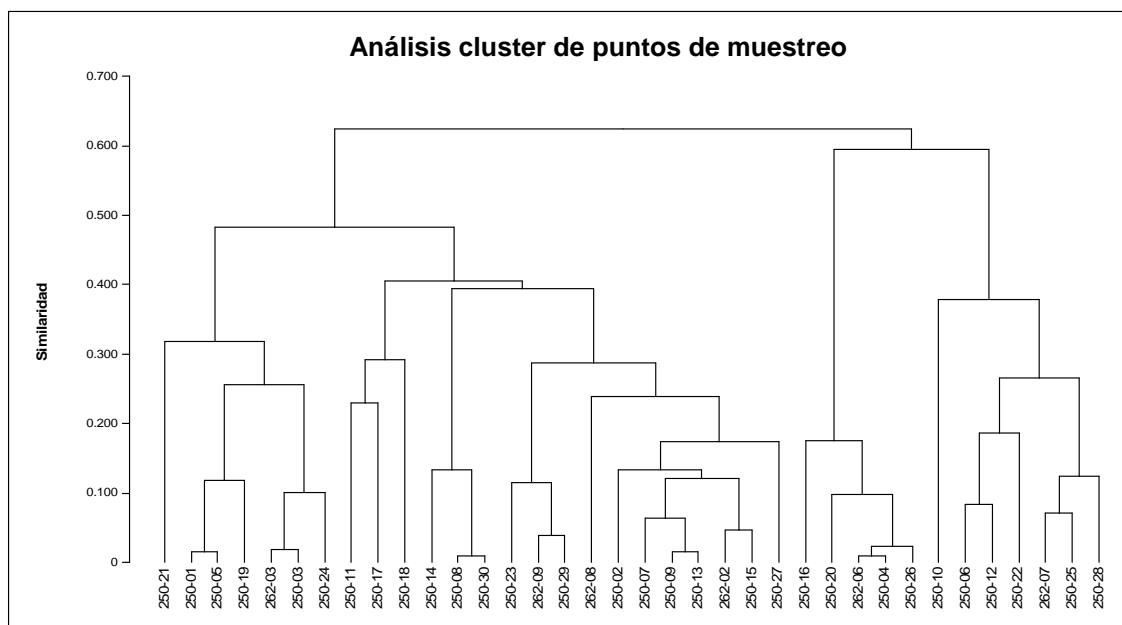


Figura 11.- Análisis cluster de puntos de muestreo.

## Conclusiones

Las aguas muestreadas se caracterizan por presentar un amplio rango de variación de los parámetros físico-químicos, debido principalmente a la complejidad estructural y litológica de la zona, dominada por fallas, cabalgamientos, etc. A esto se suma el hecho de que provienen de la mezcla de aguas de precipitación directa, de aguas de escorrentía superficial y de agua subterránea con mayor o menor tiempo de residencia.

A esta complejidad inicial se suma la actividad minera que ha permitido la exposición de minerales a condiciones oxidantes, favoreciendo la liberación de metales pesados en las zonas de acumulación de residuos mineros.

Además, de forma natural, muchas de estas aguas presentan carácter ácido, lo cual favorece la disolución de metales pesados.

Desde el punto de vista de las aguas subterráneas, aunque la cuenca carbonífera del Bierzo, constituida principalmente por materiales paleozoicos como areniscas, cuarcitas, pizarras y conglomerados, presenta un comportamiento como acuífero poco significativo, localmente, debido a zonas de fracturación o diaclasas pueden almacenar y transmitir agua en cantidades aprovechables. Se trata pues de aguas de corto recorrido y rápido tránsito por tanto poco maduras y de reducida mineralización y conductividad eléctrica.

Las aguas superficiales muestran conductividades mas elevadas al representar aguas con tiempos de residencia mayores.

El anión dominante, tanto en aguas superficiales como subterráneas es el sulfato, en muchos casos asociados a procesos de oxidación de sulfuros, muy abundantes en la zona de estudio y

causantes del carácter ácido de estas aguas. El carácter dominante del Mg se podría deber a la presencia de metasedimentos con presencia importante de biotitas y de otros minerales magnésicos. El Na procede principalmente de la alteración de minerales silicatados y no a la disolución de evaporitas, ya que no se ha observado correlación significativa entre Na y Cl.

A pesar de todo lo comentado anteriormente no se observan, en las aguas subterráneas, contenidos anormalmente elevados de metales pesados a causa de la alteración inducida por las actividades mineras.

No obstante, la escasa madurez de las aguas muestreadas y su composición variable son claros indicadores de que son captadas en un sistema altamente vulnerable, con bajos tiempos de residencia y de estructura heterogénea. Todo esto aconseja tomar medidas estrictas de prevención de la contaminación, en especial la derivada del lixiviado de escombreras o vertidos directos, aunque sean superficiales.

## **Agradecimientos**

Este trabajo se encuentra dentro del proyecto “Evaluación del impacto y restauración ambiental de la cuenca minera del Bierzo”. Los autores agradecen al responsable del proyecto Lucas Vadillo y a su equipo de trabajo la ayuda prestada. Así mismo, agradecemos la colaboración en aspectos gráficos a Esteban de la Cruz.

## **Referencias**

- Cánovas, J. (1986). “Calidad agronómica de las aguas de riego”. Publicaciones del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Pp 55.
- Google Earth. <http://earth.google.es/>
- IGME (1984). “Revisión y síntesis geológico-minera de la Cuenca Carbonífera de El Bierzo (León)”.
- INAQUAS (2008). Moreno, L; De la , A. “Programa de interpretación de análisis químicos de aguas subterráneas”. <http://www.icog.es>
- *R.D. 140/2003*, de 7 de febrero, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano.
- <http://edafologia.ugr.es/Revista/Tomo5/a71t.htm>
- U.S. Salinity Laboratory Staff (1954). “Diagnosis and improvement of saline and alkali Soils”. L.A. Richards, Ed. U.S. Dept. of Agriculture, Washington, D.C., rev. ed.



*ANEXO 1*

FICHAS DE PUNTOS DE AGUA  
CUENCA MINERA DEL BIERZO (LEÓN)