

Agua y minería en El Bierzo y Laciana

Una primera aproximación al estado de las masas de agua y su posible afección por el abandono de la minería de carbón

David Ángel García García

Universidad de León

En el presente estudio se muestra una primera aproximación a la actualización del estado de las masas de agua en la cuenca del Bierzo y Laciana y su posible afección por el abandono de la minería del carbón. Para ello, se han tomado 92 muestras entre arroyos, ríos, manantiales, fuentes y pozos, en 4 campañas a lo largo de dos años hidrológicos: 2 campañas en aguas altas (primavera) y 2 campañas en aguas bajas (inicio de otoño). De este modo, se presenta una imagen general de toda la zona de estudio que comprende las aguas superficiales y las subterráneas, con el afán de desvelar las posibles interacciones entre las estructuras mineras abandonadas, sus afecciones en la superficie y su repercusión en las aguas subterráneas. Se han medido in situ los principales parámetros (pH, T, CE, DO, Eh, etc.) y se han analizado en laboratorio los principales iones y metales disueltos. Además, se han calculado índices de saturación de diferentes minerales, alcalinidad y TDS, para comprender, de una manera global, los mecanismos que están operando en las diferentes masas de agua. Los resultados muestran que, tras el cierre desordenado y abandono de las minas de carbón en la zona de estudio, se han producido una serie de lixiviados procedentes de escombreras y minas abandonadas que están aportando aguas ácidas cargadas de sulfatos y metales pesados y que contaminan las aguas superficiales y algunas zonas de las subterráneas hasta el punto de hacer inviable para el consumo humano algunas de estas masas de agua.

Cualquier actividad desarrollada por el ser humano tiene una inherente afección sobre el ecosistema donde se realiza. Del conocimiento de dicha afección y del grado de importancia que se otorga al deterioro del medio versus el beneficio económico, depende en gran medida el daño que se causa al ecosistema. La minería no está exenta de estos dilemas y en concreto, la minería de carbón que es la que nos atañe en este caso. Además, se suma a este asunto que el cierre desordenado y abandono de las explotaciones mineras en la cuenca del Bierzo y Laciana ha causado la existencia de más de 600 escombreras y 50 puntos de lixiviado catalogados en el inventario realizado por el IGME y CIEMAT entre 2006 y 2010 (Vadillo Fernández *et al.*, 2006). Desde entonces y hasta hoy en día, es bien seguro que hayan aparecido nuevos puntos de lixiviado y tal vez, en algunas zonas se ha producido la denominada atenuación natural (Vadillo Fernández *et al.*, 2006; Rodríguez Gómez *et al.*, 2010), favorecida por una confluencia de parámetros promotores de la regeneración y que amortigüe el efecto de la contaminación.

Las aguas ácidas de mina son un fenómeno bien conocido en el mundo de la minería, tanto en la metálica como en la de carbón. La generación de estas aguas ácidas está propiciada por la oxidación de la pirita, mineral presente en las pizarras que se intercalan entre las capas de carbón. La pirita (FeS_2) es un sulfuro de hierro formado por hierro y azufre que, en presencia de agua cargada de oxígeno, se descompone en el ion ferroso (SO_2^-) y en el ion sulfato (SO_4^{2-}), dando lugar a una serie de reacciones (Fig. 1) que producen el descenso del pH y, por tanto, la acidez.

Esta acidez, a su vez, favorece la remoción de metales pesados presentes en los minerales que forman las rocas donde se encuentra el carbón, liberando además del hierro, aluminio en bastante abundancia y diferentes cantidades de níquel, zinc, manganeso y otros metales. Estas aguas ácidas, características por su color naranja, fluyen por los arroyos cargadas de estos elementos y confluyen en ríos, contaminando ambos hasta niveles que, en ocasiones, hacen que esta agua sea inviable para el

consumo humano (superando, por ejemplo, niveles de 250 mg/l de sulfato (SO_4^{2-}), establecidos por el R.D. 3/2023 de calidad del agua de consumo; BOE, 2023).

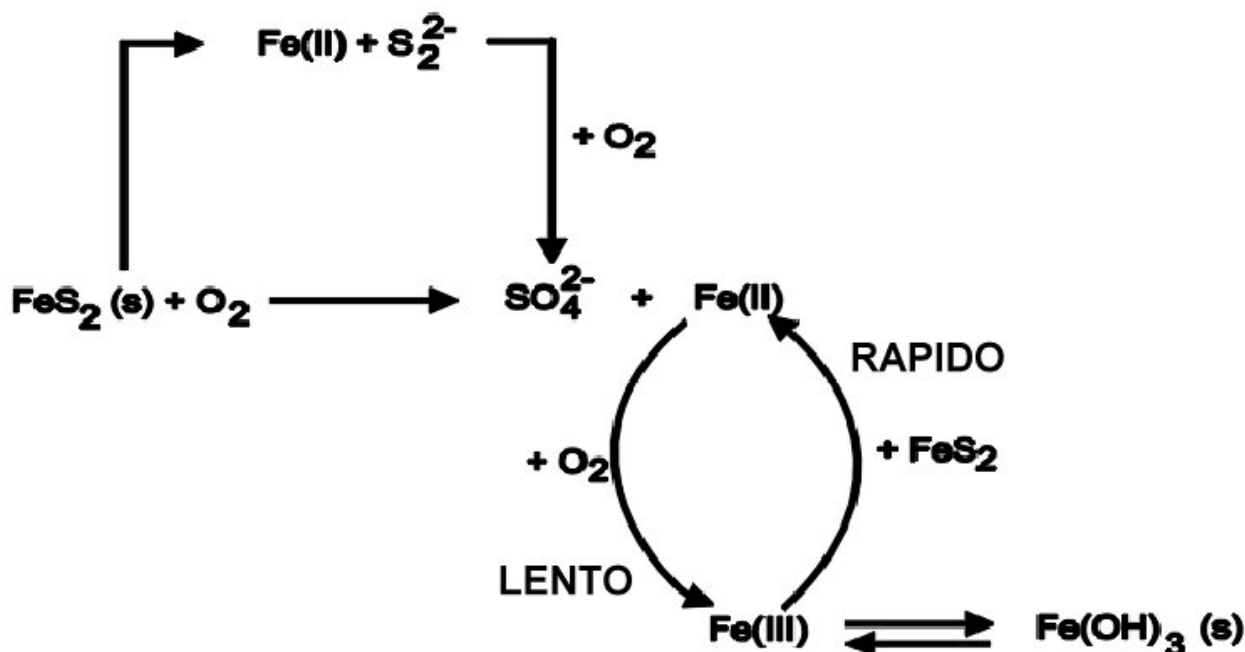


Figura 1. Formación de aguas ácidas (Aduvire, 2006).

Los primeros estudios datan de 1990 (Gómez Fernández, 1990; Luis Calabuig *et al.* 1990), donde se presentaban ya los primeros indicios de la contaminación de la minería del carbón (en esos años aún activa). Los estudios continúan con diversos trabajos sobre los macroinvertebrados de la zona y su afección por las aguas ácidas (De Soto *et al.*, 1994; García Criado, 1999; García-Criado *et al.*, 1999a; García-Criado *et al.*, 1999b; Fernández-Aláez *et al.*, 2002). Los primeros estudios sobre aguas subterráneas son de 2008-2010 (de la Losa Román *et al.*, 2008; de la Losa *et al.*, 2010), donde ya se aprecia que el cierre de la minería, que se venía produciendo desde alguna década anterior, está causando múltiples afecciones a las masas de agua. En esos primeros estudios se observaron cantidades anómalas de sulfatos, pero todavía no se localizaban acumulaciones de metales pesados anormalmente elevadas en las masas de agua estudiadas (a excepción de algunas zonas puntuales en la cuenca del Tremor).

En el presente estudio, al análisis de las aguas superficiales se ha incorporado el de las aguas subterráneas que, si bien han sido estudiadas anteriormente (de la Losa Román *et al.*, 2008; de la Losa *et al.*, 2010; García Álvarez y Cantó Portillo, 2010), no hay estudios actuales que nos muestren el grado de afección y su evolución en el tiempo, ni su relación con lo que está pasando en la superficie a día de hoy. Lo mismo ocurre con las aguas superficiales, que han sido objeto de múltiples trabajos a lo largo de los años (Gómez Fernández, 1990; Luis Calabuig *et al.*, 1990; Fernández-Aláez *et al.*, 2002; García Criado, 1999; García-Criado *et al.*, 1999a; García-Criado *et al.*, 1999b; Herrero Barrero, 2014), esencialmente focalizados en el estudio de las diferentes afecciones de las aguas ácidas sobre los seres vivos acuáticos tales como peces y macroinvertebrados principalmente.

En este trabajo se pretende aunar la visión que estos estudios han presentado de manera independiente, para mostrar una actualización del estado físico-químico de las masas de agua superficiales y subterráneas afectadas por la contaminación de aguas ácidas de mina provenientes de las diferentes escombreras repartidas a lo largo del territorio y de los diferentes puntos de lixiviado procedentes de estas escombreras y de bocaminas de las minas abandonadas donde no se está realizando ningún tipo de control y mucho menos el pertinente bombeo para controlar el nivel freático dentro de ellas para que estos vertidos no se produzcan.

Área de estudio

Se ha trabajado sobre un área de 3450 km² que se corresponde con las comarcas del Bierzo y Laciana en la provincia de León (Fig. 2); dentro de las cuales se encuentran la mayoría de los bloques de la cuenca carbonífera explotada en la zona (IGME, 1983; queda fuera de estudio la zona de Valdesamario).

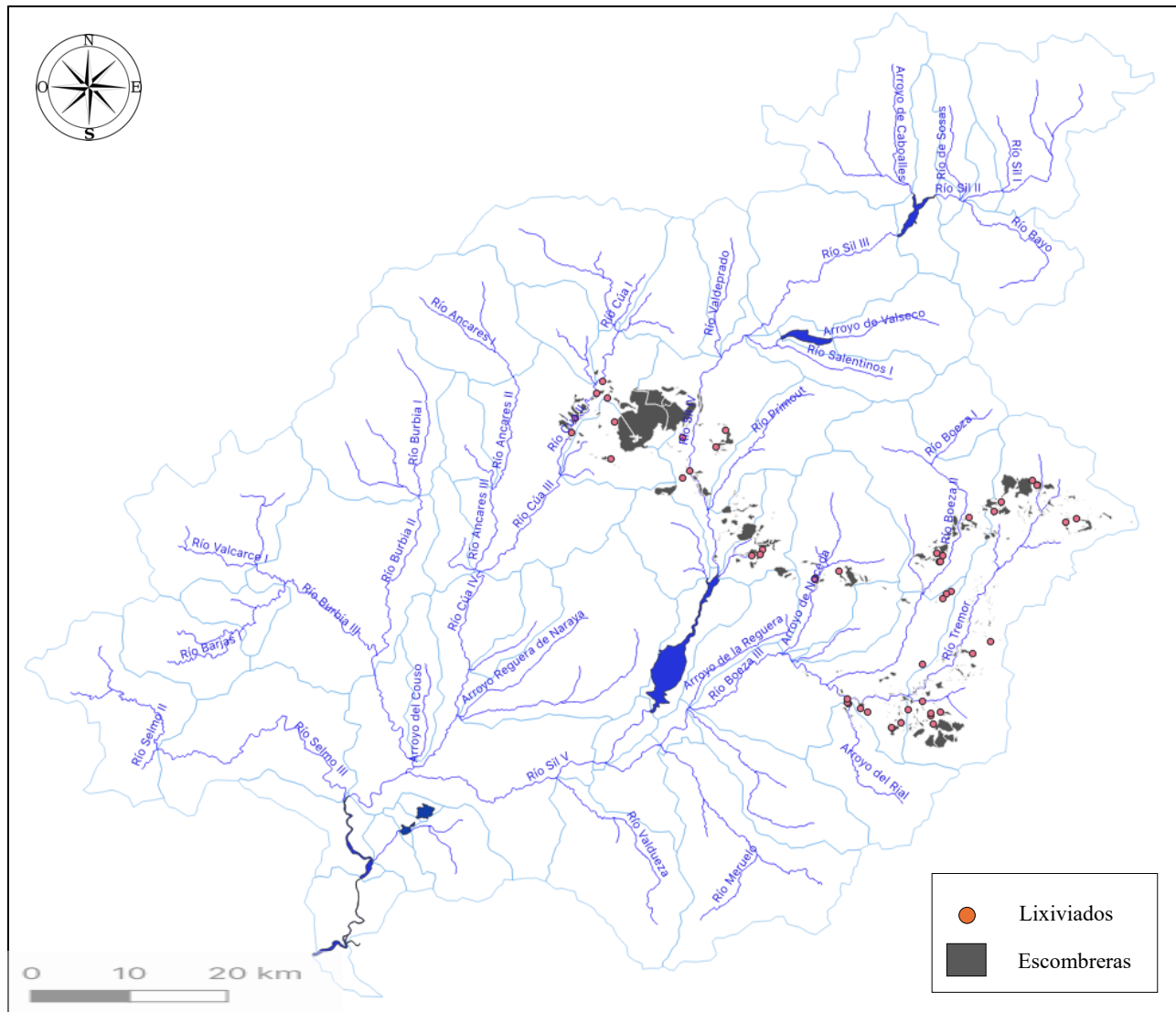


Figura 2. Área de estudio con los principales ríos y arroyos y las subcuencas delimitadas (datos de lixiviados y escombreras de IMABIERZO 2010).

Las aguas superficiales muestreadas dentro del área de estudio se corresponden con los principales ríos en la cuenca del Sil (Sil, Selmo, Burbia, Cúa, Boeza y Tremor) y sus principales afluentes (Valcarce, Ancares, Caboalles, Noceda, Rodrigatos y Silva), con el objetivo de mostrar un área extensa que contenga puntos de control no solo aguas arriba de las masas de agua afectadas por la presencia de escombreras y lixiviados de minas, sino también en otras zonas no afectadas por esta minería de carbón como son la zona del Selmo, Burbia y Ancares. Se ha dejado fuera del estudio a la subcuenca de La Cabrera, por quedar ya bastante desubicada respecto a los objetivos de este trabajo.

Las aguas subterráneas se corresponden con la reciente clasificación realizada en el Plan de Cuencas de la Confederación Hidrográfica del Miño-Sil 2022-2027 (C.H. del Miño-Sil, 2022), donde se delimitan 6 masas de agua subterráneas; a saber: Cubeta del Bierzo, Alto Sil, Burbia-Cúa, Caboalles, Boeza y Selmo. Esta última se ha dejado fuera del presente estudio por localizarse demasiado alejada de la cuenca carbonífera y, por tanto, de su posible influencia sobre esta masa.

La cuenca minera del Bierzo (Fig. 3) 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 (Fernández García *et al.*, 1984).

La zona central de la cuenca está ocupada por materiales terciarios y cuaternarios, (representados principalmente por arenas, arcillas y gravas) y muestran relieves suaves con altitudes medias de 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 una orla montañosa con altitudes que superan los 1000 m (de la Losa *et al.*, 2010).

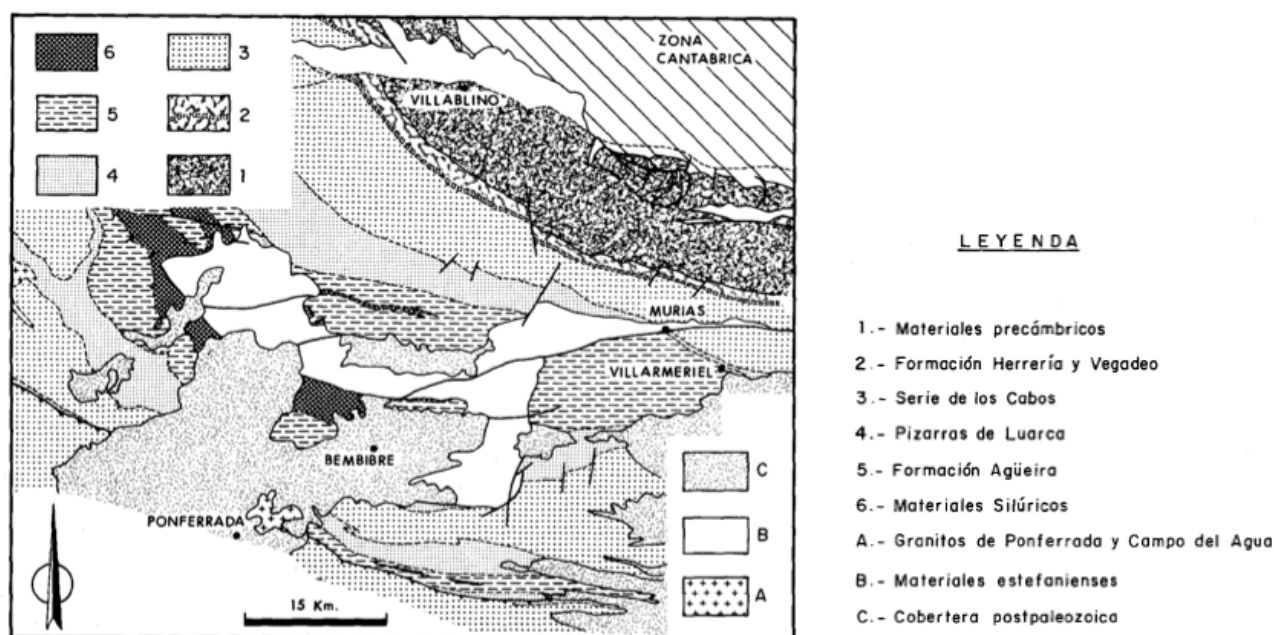


Figura 3. Encuadre geológico-regional de la cuenca carbonífera del Bierzo (Fernández García *et al.*, 1984).

Materiales y métodos

Muestreo

Se han seleccionado 92 puntos de muestreo (Fig. 4), 46 de aguas superficiales (ríos y arroyos) y 46 de aguas subterráneas (manantiales, fuentes y pozos). De los ríos y arroyos se extraen las principales captaciones para abastecimiento de las poblaciones; también de fuentes y manantiales y los pozos, de escasa profundidad (6-9 m), son de uso agrícola familiar (de la Losa *et al.*, 2010). Los datos de caudales de los ríos y arroyos son de la Confederación Hidrográfica del Miño-Sil y varían entre 10 y 0,6 m³ en primavera y entre 7 y 0,3 m³ en otoño; las cotas están entre 1360 y 365 m. Las distancias al nacimiento oscilan desde 4,5 hasta 99 km. Las fuentes y manantiales presentan caudales desde 2 a 0,001 l/s, y las cotas se encuentran entre 1390 y 500 m. Los puntos controlados se encuentran principalmente sobre materiales paleozoicos, terciarios y cuaternarios.

Las campañas de muestreo se realizaron entre octubre de 2020 y abril de 2022; cuatro campañas en total: 2 en aguas bajas (octubre 2020 y octubre 2021) y 2 en aguas altas (abril 2021 y abril 2022). Se han seguido las directrices del MITERD (Calleja Arriero *et al.*, 2021), del USGS (2018) y normas estandarizadas UNE (AENOR, 2024a, 2024b). Los parámetros físico-químicos medidos *in situ* fueron: temperatura, pH, conductividad eléctrica (CE), oxígeno disuelto (DO), potencial rédox ORP (Eh), turbidez y nivel piezométrico. Se tomaron dos muestras de agua en botes HDPE opacos de 500 ml y 50 ml, una para análisis de iones principales, y la otra, previamente acidificada con HNO₃ hasta pH < 2 para análisis de metales disueltos. Las muestras se trasladaron en nevera hasta el laboratorio, donde también se conservaron en nevera a 4°C hasta ser analizadas. Las muestras se han

filtrado por 45μ antes de su análisis, los elementos mayoritarios y metales pesados se han llevado a cabo mediante los métodos estandarizados para el análisis físico-químico de aguas del laboratorio de CIUDEN, basados en normas de referencia (AENOR, 2000, 2010, 2012, entre otras).

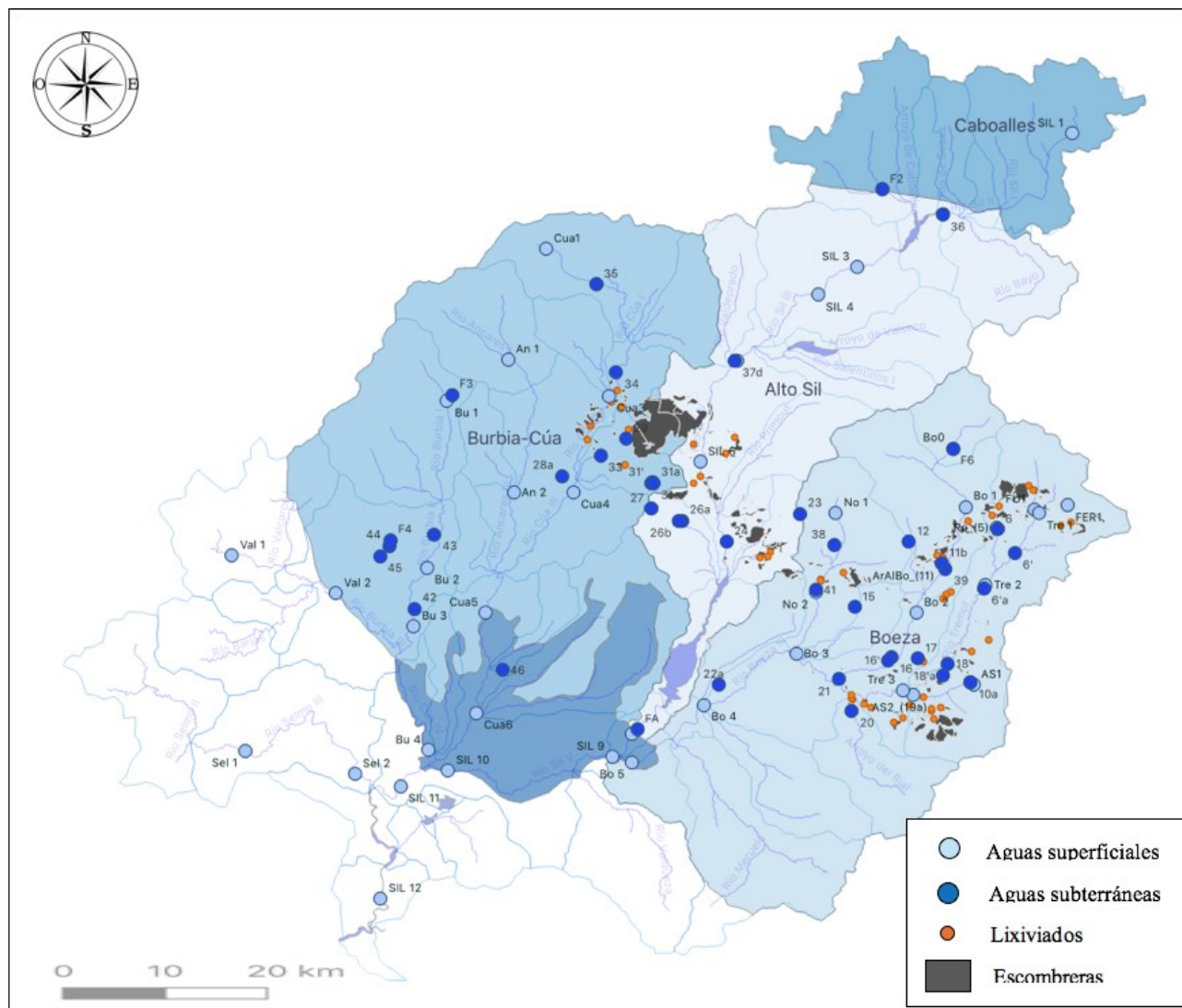


Figura 4. Puntos de muestreo en el área de estudio (se encuentran resaltados los acuíferos en tonos azules sobre las subcuencas superficiales (datos de escombreras y lixiviados de IMABIERZO 2010).

Métodos

Para las mediciones *in situ* y los análisis de las aguas se ha contado con los equipos y el laboratorio de la Fundación Ciudad de la Energía. En campo se han utilizado los siguientes equipos: sonda multiparamétrica Hach HQ40d para CE, pH, T, ORP, turbidímetro de Hach 2100 Q, Eutech DO600 para el oxígeno disuelto, y sonda de Nivel Weiss CM235150. En el laboratorio se ha medido de nuevo la CE y pH con las sondas de Crison GLP 22 (pH) y GLP 31 (CE y TDS), además se ha hecho una valoración de la alcalinidad con el Valorador de Metrohm (905 titrando, 814 Sample procesor y otras unidades); se han realizado análisis de iones principales con el cromatógrafo iónico METROHM (850 PROFESSIONAL IC, columnas Metrosep A Supp 7 y C3 250/4.0) y de metales disueltos con el ICP-OES OPTIMA 8000 de PERKIN ELMER.

Resultados y discusión

Geoquímica de las masas de agua

En la Tabla 1 se presenta un análisis estadístico de todas las muestras de agua analizadas. Existen diferencias significativas entre las aguas superficiales y las subterráneas, sobre todo en cuanto al contenido de metales (principalmente aluminio, manganeso, estroncio y zinc). Los contenidos en sulfatos son similares.

La temperatura en las aguas subterráneas presenta valores ligeramente más elevados que en las aguas superficiales y oscila entre 8,25°C en un manantial en Villablino (en la zona de los lavaderos en primavera) y 21,90°C en la fuente del azufre (otoño), valores cercanos a los de las aguas termales. El pH en las aguas subterráneas es también ligeramente mayor que en las superficiales y varía de 4,42 en el manantial de San Pedro de Paradela (en otoño, en este caso se ve que se trata de aguas ácidas naturales, ya que tienen una conductividad de unos 60 µg/l todo el año) y 10,40 en la fuente a la entrada de Boeza (en primavera,). La conductividad eléctrica en las aguas subterráneas es bastante similar a la de las superficiales; oscila entre 10,80 µs/cm en el manantial de Espina de Tremor (en otoño) y 1746 µs/cm en una fuente en la Granja de San Vicente (primavera). Estos valores reflejan por un lado aguas de escaso recorrido y por el otro veremos que se trata de contaminación por parte de la minería de carbón. El oxígeno disuelto en las aguas subterráneas es también similar al de las aguas superficiales; lo que refleja, al igual que la conductividad, que se trata de aguas de escaso recorrido a las que no les da tiempo a perder la oxigenación. Los valores se encuentran entre 1,81 mg/l en un pozo en Folgoso de la Ribera (otoño) y 9,31 mg/l en la fuente del Cangalón (a la entrada de Fabero, en primavera). La turbidez en las aguas subterráneas presenta un máximo el doble que el de las superficiales, los valores oscilan entre 0,13 NTU en el manantial de Otero (otoño) y 35 NTU en una fuente en San Miguel de Langre (primavera). El Eh en las aguas subterráneas, presenta un mínimo bastante por debajo que el mínimo de las superficiales, los valores varían entre 59 mV en la fuente del azufre (otoño) y 741 mV en la fuente en Quintana de Fuseros (otoño), vemos valores extremos de muy reductores a muy oxidantes.

El contenido de iones presenta una abundancia $\text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^-$ en aniones, y en cationes $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+$. El contenido de aniones refleja, además de la mineralización natural debida a los materiales rocosos por los que circulan las aguas, el posible efecto de la minería de carbón. Como veremos más adelante, los lixiviados de las escombreras que, en muchos casos se encuentran literalmente sobre el cauce de arroyos y ríos, además de los lixiviados procedentes de bocaminas, afectan a las aguas superficiales de una manera directa y a las subterráneas de manera indirecta y según se puede ver en relación a estudios anteriores (de la Losa *et al.*, 2010), la afección a las aguas subterráneas parece ir en aumento. Algunos iones como el sulfato superan los valores del RD 3/2023 de calidad del agua de consumo (BOE, 2023).

La concentración en metales pesados, sobrepasa los límites del RD 3/2023 (BOE, 2023) en varios elementos (Tabla 1): en Al en la fuente Teso en Sotelo (303 µg/l en primavera y otoño) y en la captación de Sésamo (230 µg/l en primavera), en As en la fuente del azufre (145 y 122 µg/l otoño y primavera), en Fe en la fuente a la entrada de Boeza (474 µg/l en primavera), la fuente en la Granja de San Vicente (3271 y 2654 µg/l otoño y primavera), la fuente a la entrada de Tombrío de abajo (789 y 239 µg/l otoño y primavera) y la captación de Sésamo (245 µg/l primavera), en Mn en la fuente a la entrada de Boeza (230 µg/l en primavera), la fuente en la Granja de San Vicente (3369 y 2734 µg/l otoño y primavera), la fuente a la entrada de Tombrío de abajo (99 µg/l otoño) y la fuente del azufre (145 y 122 µg/l otoño y primavera), y en Pb en la fuente Teso de Sotelo (183 µg/l otoño).

En cuanto al equilibrio mineral, se puede observar que, en rasgos generales, las aguas se encuentran subsaturadas en los minerales estudiados, esto es, disolviendo calcita (CaCO_3), aragonito (CaCO_3), dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) y anhidrita (CaSO_4) con índices de saturación (Is) mínimos de -5,80 de calcita, -5,96 de aragonito y -11,66 de dolomita en la fuente Teso de Sotelo (primavera), Is -5,04 de yeso e Is -5,29 de anhidrita en el manantial de Espina de Tremor (primavera)

y algunos máximos donde las aguas se encuentran sobresaturadas en los minerales estudiados; por lo que se prevé precipitación, con Is 2,73 de calcita, 2,57 de aragonito y 5,35 de dolomita en la Fuente a la entrada de Boeza (primavera, y en otoño también está sobresaturada en estos minerales).

Parámetro	Aguas subterráneas				Aguas superficiales			
	Min	Max	Media	Desv. Est.	Min	Max	Media	Desv. Est.
T (°C)	8,25	21,90	13,22	2,55	7,35	16,80	11,27	1,95
pH	4,42	10,40	6,79	0,97	3,93	8,83	7,61	0,88
CE (µS/cm)	10,80	1.746,50	207,31	281,21	14,72	1.437,00	231,73	240,56
DO (mg/l)	1,81	9,31	6,23	1,46	6,16	8,75	7,10	0,67
Turb (NTU)	0,13	35,27	2,33	5,34	0,31	15,65	2,43	2,45
Eh (mV)	59,00	741,00	417,73	87,83	231,50	709,50	390,65	70,37
Q (l/s)	0,001	2,070	0,255	0,412	295,00	10.585,00	3.278,69	2.464,27
F- (ppm)	0,01	5,83	0,19	0,84	0,02	0,72	0,08	0,11
Cl-	0,72	81,20	5,87	12,14	0,56	39,40	3,10	4,83
NO2-	0,00	1,24	0,04	0,16	0,00	0,12	0,02	0,03
Br-	0,05	0,48	0,07	0,06	0,00	0,13	0,05	0,02
NO3-	0,00	34,27	4,69	7,45	0,26	22,73	1,65	2,93
PO43-	0,00	1,74	0,21	0,26	0,00	0,44	0,15	0,07
SO42-	0,67	931,89	40,61	136,96	1,23	840,35	75,66	133,91
Li+	0,00	0,97	0,03	0,14	0,00	0,17	0,01	0,03
Na+	0,42	98,82	8,00	15,11	0,72	22,68	3,93	2,99
NH4+	0,00	0,07	0,01	0,01	0,00	0,14	0,01	0,02
K+	0,00	13,15	1,49	2,16	0,00	1,63	0,56	0,41
Mg2+	0,39	126,67	9,50	19,20	0,42	104,59	12,36	17,93
Ca2+	1,06	216,82	20,29	33,30	1,49	183,77	22,33	23,31
TDS (mg/l)	6,37	1.091,00	127,28	176,82	8,70	869,00	144,95	154,08
TAC	0,00	3,91	1,15	1,21	0,00	2,69	0,85	0,62
HCO3- (mg/l)	0,00	232,01	69,54	72,65	0,00	163,97	51,32	37,17
Alcalinidad (mg/l CaCO3)	0,00	190,18	57,27	59,99	0,00	134,40	42,17	30,62
Si (mg/l)	1,85	12,57	3,96	1,92	1,02	4,98	2,37	0,68
Al (µg/l)	0,50	303,00	19,79	57,64	0,50	10.955,00	396,40	1.734,12
Ba	0,00	491,00	32,75	67,89	2,50	148,97	18,34	28,46
Co	0,00	11,00	4,67	4,56	0,20	260,50	12,54	34,65
Fe	0,00	3.271,50	103,14	443,18	5,50	1.979,00	129,17	320,72
Mn	0,10	3.369,00	77,95	449,72	0,10	4.528,50	131,88	582,22
Ni	0,50	3,00	0,55	0,37	0,50	260,50	7,16	33,82
Pb	1,00	183,00	2,98	18,97	1,00	1,00	1,00	0,00
Sr	0,05	254,00	32,54	53,06	0,00	362,00	41,00	54,84
Zn	0,00	73,00	2,20	9,80	0,20	569,00	14,69	72,69
As	1,00	145,00	3,88	19,50	1,00	1,00	1,00	0,00
IsCalcite	-5,80	2,73	-2,14	1,77	-3,93	0,77	-1,06	1,10
IsAragonite	-5,96	2,57	-2,29	1,77	-4,09	0,62	-1,21	1,10
IsDolomite	-11,66	5,35	-4,50	3,51	-8,30	0,98	-2,38	2,24
IsGypse	-5,04	-0,22	-3,14	1,00	-4,65	-0,30	-2,73	1,02
IsAnhydrite	-5,29	-0,47	-3,40	1,00	-4,91	-0,56	-2,99	1,02
pCO2 Ëq.[atm]	0,00001	0,07052	0,01039	0,01206	0,00009	0,00585	0,00093	0,00095
Valores RD 3/2023								
Mayoritarios (mg/l)	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	F ⁻	Cl ⁻	NH ₄ ⁺		
	250	50	0,5	1,5	250	0,5		
Minoritarios (µg/l)	Al	Fe	Mn	Ni	As	Pb		
	200	200	50	20	10	5		

Tabla 1. Análisis estadístico del total de aguas analizadas y valores según R.D. 3/2023 por el que se establecen los criterios técnico-sanitarios de la calidad del agua de consumo, su control y suministro (BOE, 2023).

La temperatura en las aguas superficiales se encuentra entre 7,35°C en el Sil en Quejo (primavera) y 16,80°C también en el Sil a la altura de Villadepalos (otoño). El pH se encuentra entre 3,93 en el arroyo de la Silva en el propio pueblo (otoño) y 8,83 en el río Selmo a la altura de Oencia (otoño). Existe una baja variabilidad en cuanto al pH; en general, la mayoría de las aguas se encuentra entre 6 y 8 de pH, con una media de 7,61 y desviación estándar de 0,88. Una de las excepciones es el arroyo de la Silva, que sufre contaminación de aguas ácidas de roca por la construcción de la A6 (Vadillo *et al.*, 2010) y por la aportación de varios arroyos cargados de aguas ácidas procedentes de minas del entorno. Que el pH en el resto de subcuencas se encuentre en valores tan neutros a pesar del aporte

de aguas ácidas en varios de ellos, se puede explicar por posibles efectos de atenuación natural (Vadillo Fernández *et al.*, 2006) y/o por la dilución producida por el aporte de aguas limpias procedentes de arroyos tributarios. La conductividad eléctrica varía de 14,72 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en el río Cúa cercano al nacimiento (en Guímara en otoño) y 1437 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en el pequeño arroyo de la Calle San Antonio que da al Boeza (otoño). En general la C.E. no es muy elevada excepto en algunas zonas de la cuenca del Tremor (principalmente); no obstante, se notan los efectos de las aguas ácidas en las cuencas del Cúa, el Sil y el Boeza, aunque de manera amortiguada por los efectos anteriormente mencionados. El oxígeno Disuelto varía entre 6,16 mg/l en el río Boeza en Folgoso de la Ribera (primavera) y 8,75 mg/l en el río Sil en Palacios del Sil (primavera). La turbidez se encuentra entre 0,31 NTU en el río Boeza en Colinas del Campo (otoño) y 15,6 NTU en el río Tremor en Tremor de Arriba (otoño). El Eh oscila entre 231 mV en el río Tremor en Tremor de Arriba (primavera) y 709 mV en el arroyo de la Silva en el pueblo (otoño); vemos valores no tan extremos como en las subterráneas, pero siguen siendo de bastante reductores a muy oxidantes.

El contenido en iones presenta una abundancia $\text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^-$ en aniones, y en cationes $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+$. Al igual que en las aguas subterráneas, el contenido de aniones refleja, además de la mineralización natural debida a los materiales rocosos por los que circulan las aguas, el posible efecto de la minería de carbón. Algunos iones como el sulfato superan los valores del RD 3/2023 de calidad del agua de consumo.

La concentración en metales pesados sobrepasa los límites del RD 3/2023 (BOE, 2023) en varios elementos: en Al en el arroyo de la Silva antes de la desembocadura en el Tremor, con valores máximos de 10 995 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en otoño, y en el río Tremor a la altura de Torre del Bierzo, con valores máximos de 1549 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en otoño; en Fe en el arroyo de la Silva, máx. 1979 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en otoño, en el Boeza a la altura de Bembibre con máx. de 220 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en otoño, en el Sil a la altura de Cuevas del Sil con máximos de 320 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en otoño, en el río Tremor en Tremor de Arriba con máximos de 1294 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en otoño; en Mn en el arroyo de la Silva antes de la desembocadura en el Tremor, con máximos de 4528 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en otoño, en el Boeza a la altura de Bembibre con máximos de 205 en otoño, en el Cúa en Vega de Espinareda, con máximos de 51 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en otoño, en el Sil en Cuevas del Sil con máximos de 78 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en otoño, y en Tremor en Torre del Bierzo, con máximos de 1021 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en otoño; y en Ni en el arroyo de la Silva, con máximos de 260 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en otoño antes de la desembocadura del Tremor, y en el río Tremor con máximos de 33 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en otoño en Torre del Bierzo.

En cuanto al equilibrio mineral, se puede observar que, en rasgos generales, las aguas se encuentran subsaturadas en los minerales estudiados, esto es, disolviendo calcita (CaCO_3), aragonito (CaCO_3), dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) y anhidrita (CaSO_4) con Is mínimos de -3,93 de calcita, -4,09 de aragonito, -8,30 de dolomita, Is -4,65 de yeso e Is -4,91 de anhidrita en el río Cúa en Guímara (otoño), y algunos máximos donde las aguas se encuentran sobresaturadas en los minerales estudiados; por lo que se prevé precipitación, con Is 0,77 de calcita, 0,62 de aragonito en el río Valcarce en las Herrerías (en otoño) y 0,98 de dolomita en el río Sil en Villablino (en otoño).

Para hacer un estudio completo de la caracterización de las aguas se ha realizado una representación gráfica de los datos en un diagrama de Piper (Fig. 5).

La facies predominante es la bicarbonatada cálcico y magnésica, donde se encuentran la mayoría de las muestras (superficiales y subterráneas). Esto demuestra que las aguas subterráneas están directamente conectadas a las superficiales, donde no hay grandes tiempos de residencia que aumenten drásticamente la mineralización y las diferencien de las superficiales.

La segunda facies mayoritaria es la sulfatada cálcico y magnésica (en este caso poco tiene de clorurada), donde se encuentran principalmente aguas superficiales y muy pocas subterráneas. Se han representado también las muestras de dos bocaminas (la primera, BOC1, en el margen derecho del arroyo Rodrigatos, y la segunda, BOC40, en Ventas de Alvares) que se han analizado en este trabajo para tenerlas como referencia; y se puede ver que se sitúan en el pico de arriba de la facies sulfatada cálcico y magnésica junto a muestras del arroyo de la Silva (19a_AS2) y el río Tremor (Tre3) y su

arroyo de cabecera el Fullinas (FU), de las más afectadas; y les siguen el río Cúa (Cua6), el Boeza (Bo4) o el río Sil (Sil8, Sil9), también afectadas, pero en menor medida. De las aguas subterráneas, destacan la fuente de la Granja San Vicente (18'a), la Captación de Sésamo (28a) o el Manantial al pie del Hostal Salomé en Toreno (24) entre otras. En este caso se demuestra que la afección por sulfatos está afectando principalmente a las aguas superficiales, ya que son estas las que reciben los lixiviados de escombreras y los flujos de las bocaminas en superficie. Solo unas pocas muestras de aguas subterráneas presentan estas facies y se puede decir que la contaminación por sulfatos y metales pesados está llegando también a los acuíferos.

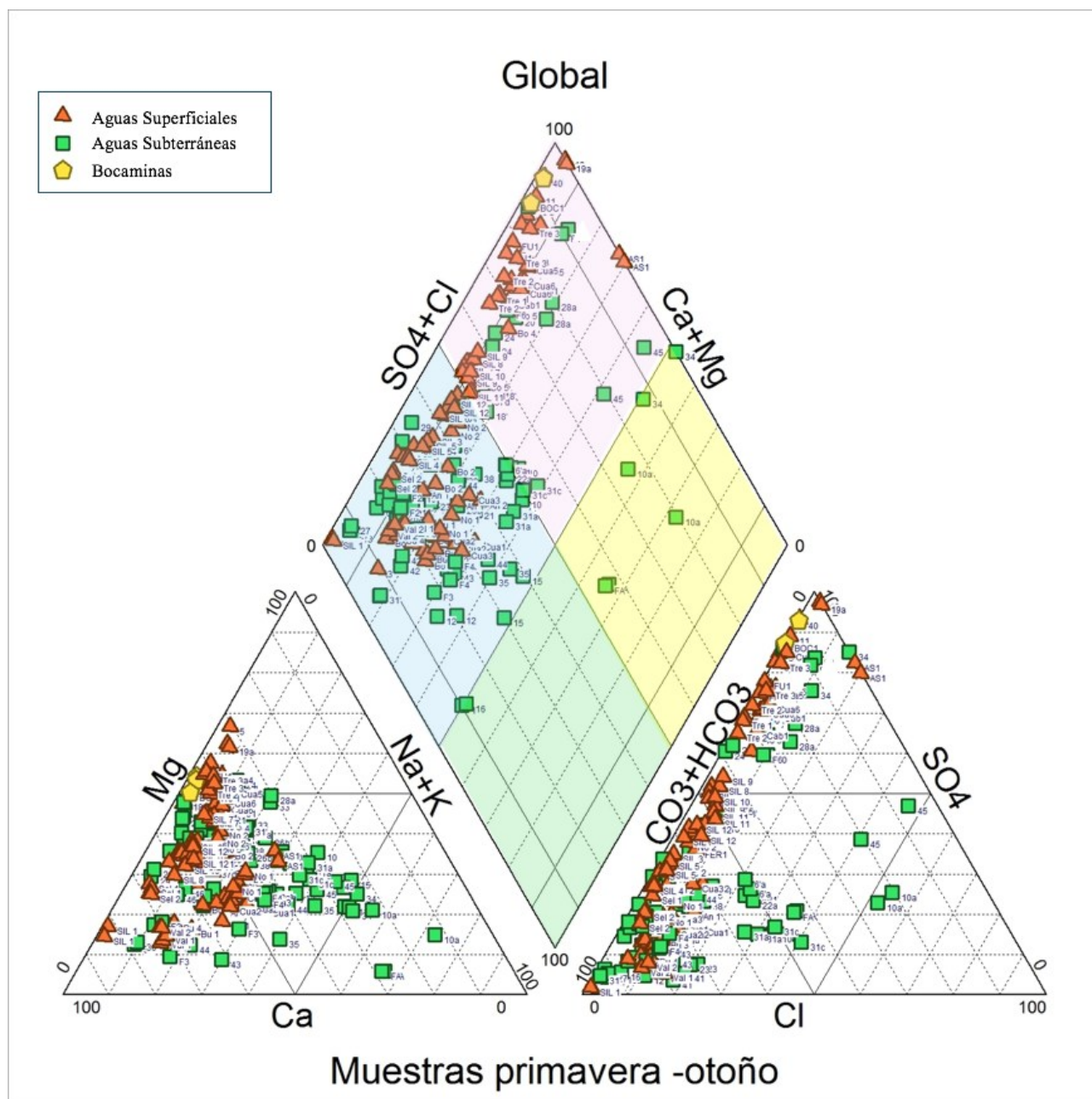


Figura 5. Diagrama de Piper para el global de las muestras, incluyendo también dos bocaminas de referencia que se analizaron en el presente estudio (morado: facies clorurada y sulfatada cálcico y magnésica, azul: facies bicarbonatada cálcico y magnésica, amarillo: facies clorurada sódica y potásica o sulfatada sódica, verde: facies bicarbonatada sódica y potásica).

Las siguientes facies, con muy poca representación, son la clorurada sódica y potásica o sulfatada sódica, con solamente aguas subterráneas como el manantial de San Pedro de Paradela (34), un manantial en el pueblo de La Silva (10a) o la fuente del azufre (FA); y la facies bicarbonatada sódica

y potásica, que se podría decir que un manantial está en el límite de esta facies (la captación de la Ribera de Folgoso, 16).

También se han representado en un mapa del área de estudio los diagramas de Stiff de las aguas superficiales (Fig. 6), con el fin de representar su distribución espacial, así como, para ver de una manera más clara la relación de la composición química de las aguas con las estructuras mineras de la zona. Se aprecia que existen 5 principales grupos o familias de aguas (facies):

Grupo 1: Formas Alargadas / “Punta de Lanza” Vertical. Son polígonos muy estrechos y estirados verticalmente en el centro, lo que indica una mineralización global muy baja (aguas muy blandas, típicas de cabeceras de montaña o terrenos silíceos). Puntos incluidos: río Cúa (Cua1, Cua2), río Ancares (An1), río Burbia (Bu1), río Boeza (Bo0, Bo1), etc.

Grupo 2: Rombos Simétricos / “Diamantes”. Tienen una forma ensanchada de manera equilibrada hacia la izquierda y la derecha, con puntas marcadas a ambos lados. Representa aguas bicarbonatadas cálcicas con un equilibrio iónico moderado. Puntos incluidos: río Valcarce (Val1, Val2), río Selmo (Sel1, Sel2), río Sil (Sil1), río Burbia (Bu4), etc.

Grupo 3: Existe una variación del rombo del grupo 2 con la base alargada hacia ambos lados. Son aguas sulfatadas bicarbonatadas cálcico-magnésicas. Puntos incluidos: Sil2, Sil3, Sil10, Sil11, Sil12, etc.

Grupo 4: Formas Triangulares Achatadas con un perfil muy bajo y una prolongación asimétrica y picuda de mayor tamaño hacia la derecha. Son aguas también bicarbonatadas, pero con altas concentraciones de sulfatos (SO_4^{2-}), cálcicas y magnésicas. Puntos incluidos: río Tremor (FU1, Tre1, Tre2, Tre3), arroyo Rodrigatos (Ro), río Boeza (Bo3), etc.

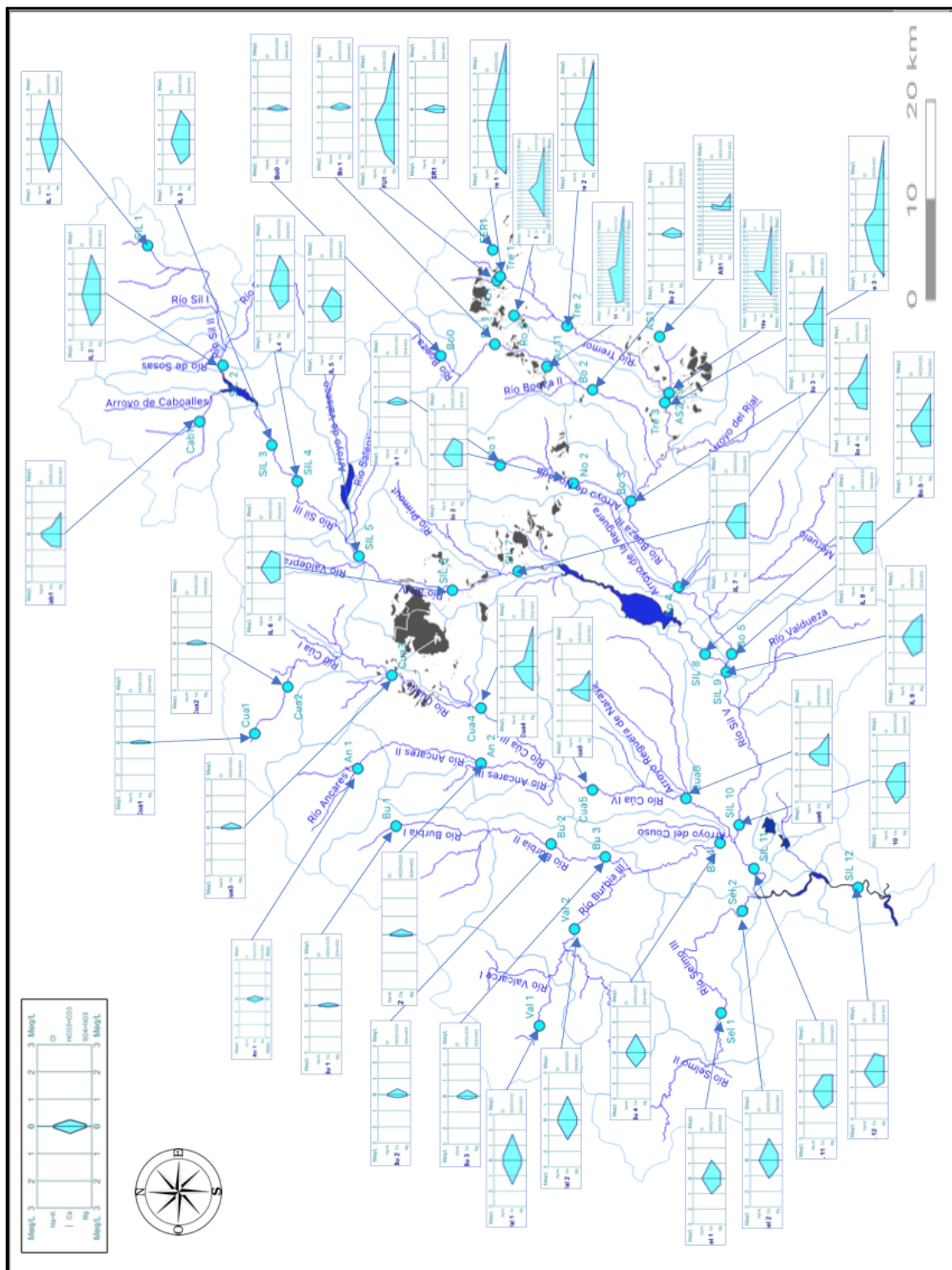
Grupo 5: Polígonos Asimétricos Ensanchados en la base (semejantes al grupo 4 pero con menos bicarbonatos). Son aguas sulfatadas cálcico-magnésicas. Puntos principales: arroyo Caboalles (Cab1), río Cúa (Cua5, Cua6). El arroyo de la Silva (AS1, AS2) sería de este grupo, pero con elevadísimas concentraciones de sulfatos.

Se puede apreciar claramente cómo los ríos y arroyos de la zona oeste (Selmo, Valcarce, Burbia, Ancares) no atraviesan estructuras de minería (escombreras ni lixiviados) y por lo tanto no se encuentran afectados por las aguas ácidas. Pertenecen principalmente a los grupos 1 y 2, aguas bicarbonatadas cálcicas, que en las cabeceras son de mineralización muy débil y van cargándose de estos elementos de manera natural a lo largo de su recorrido.

El río Cúa en la cabecera también pertenece al grupo 1, pero se puede observar cómo al pasar por Vega de Espinareda (Cua4) la facies cambia al grupo 5, aguas con pocos bicarbonatos, sulfatadas cálcico y magnésicas. Esta elevada concentración de sulfato la recoge de la gran estructura minera de Fabero y de otras menores de la zona, con grandes escombreras y lixiviados que se encuentran en los márgenes del río como se puede ver en la Fig. 3. Se puede ver además, cómo se produce atenuación por dilución a la altura de Quilós (Cua5) al recibir las aguas del río Ancares del grupo 1.

Lo mismo sucede en el Sil, que en su cabecera presenta facies del grupo 2 (aguas bicarbonatadas cálcicas), y ya en Villablino (Sil2) pasan a ser del grupo 3 (aguas sulfatadas bicarbonatadas cálcico-magnésicas) por el aporte de aguas de mina y lixiviados de escombrera de la zona. En el caso del Sil se producen leves atenuaciones, pero al seguir recibiendo aguas que drenan escombreras y que reciben lixiviados, se va manteniendo este grupo y se puede observar un aumento de sulfatos cuando se encuentra con el Boeza y recibe sus aguas a la altura de Ponferrada (Sil9).

Lo mismo pasa con el río Noceda y con el Boeza, con aguas en cabecera del grupo 1 y en el caso del Boeza se puede observar cómo después de recibir las aguas del Tremor en Bembibre (Bo3) pasan a ser del grupo 3 hasta desembocar en el Sil.



En el caso del Tremor, el más afectado de toda el área de estudio, ya desde cabecera empieza en el grupo 4 a pesar de tener uno de sus arroyos de cabecera grupo 1 (FER1), y mantiene el grupo a lo largo de su curso, mantenido por aportes del arroyo Rodrigatos (también muy contaminado) y el Arroyo de la Silva (extremadamente contaminado), entre otros.

Además del presentado en la Fig. 5, se ha realizado un análisis de correlación según Pearson; en la Tabla 2 se muestran los coeficientes de correlación. Los valores que aparecen en verde y amarillo son valores altamente significativos (correlación positiva: verde claro y oscuro, correlación negativa:

amarillo). Se presentan en este estudio las correlaciones de los parámetros medidos *in situ*, los elementos mayoritarios y los minoritarios.

La temperatura presenta una correlación positiva con el fluoruro, cloruro, bromuro, sodio y sílice. El pH tiene correlación positiva con los bicarbonatos y negativa con el Eh, aluminio y zinc. La conductividad eléctrica presenta una correlación positiva fuerte (verde oscuro) con los sulfatos, magnesio y calcio, manganeso y estroncio, y algo menor con bicarbonatos y hierro. La turbidez presenta correlación positiva con los nitritos, y algo menor con magnesio y calcio. El Eh tiene correlación negativa con litio y arsénico, y positiva con aluminio, níquel y zinc.

Respecto a los elementos mayoritarios, fluoruros y cloruros presentan correlación positiva fuerte con bromuro, litio, sodio y arsénico. Los nitratos y fosfatos, correlación positiva fuerte con potasio, indicando un posible origen en abonos para agricultura. Los sulfatos, correlación positiva fuerte con magnesio, calcio y manganeso, y algo menor con estroncio y hierro; todos ellos son los principales responsables de la mineralización del agua y por tanto de la conductividad eléctrica (junto con bicarbonatos y hierro, menos abundantes en estas aguas). Litio, correlación positiva fuerte con sodio y arsénico, y menor con sílice. Sodio, correlación positiva fuerte con arsénico, y menor con bicarbonatos y sílice. Magnesio y calcio, correlación positiva fuerte con manganeso y estroncio, y menor con hierro. El magnesio, correlación fuerte positiva con calcio, y el calcio, correlación positiva con bicarbonatos. Los bicarbonatos correlación positiva con la sílice y el estroncio.

Correlación entre metales: aluminio correlación fuerte positiva con cobalto, níquel y zinc, y menor con manganeso. El hierro, correlación fuerte positiva con el manganeso. El níquel, correlación fuerte positiva con el zinc.

También se ha llevado a cabo un dendrograma con el índice de similitud euclídea (Fig. 7). Se puede observar que se diferencian dos grupos principales, por un lado el grupo 1 pertenece a las muestras que están muy cercanas a la composición del agua de la bocamina en Venta de Alvares (40); estas muestras se agrupan en dos subgrupos: las primeras más semejantes a la muestra de la bocamina como son el arroyo a la entrada de Boeza (11) y la fuente de la Granja de San Vicente (18'a), y, por otro lado, el arroyo Rodrigatos (5) y el arroyo de la Silva (19a_AS2); estas muestras presentan una fuerte influencia de las aguas ácidas provenientes de bocaminas semejantes a la de Venta de Alvares.

Grupo 2, que a su vez se subdivide en dos grandes subgrupos, el subgrupo 2.1 y el subgrupo 2.2. El subgrupo 2.2 engloba muestras que siguen teniendo una fuerte influencia de aguas de mina, como son el manantial del Hostal Salomé en Toreno (24), el río Tremor (FU, Tre1 al Tre3), el arroyo de la Silva (AS1), el manantial de Otero (29) y la fuente del azufre (FA) que la separa del resto, demostrando que su origen es diferente.

El subgrupo 2.1 se divide en otros dos grandes subgrupos, subgrupo 2.1.1 y subgrupo 2.1.2. El subgrupo 2.1.1 se divide a su vez en otros dos grandes subgrupos; por un lado podríamos decir que engloba muestras de aguas superficiales y subterráneas que están poco o nada influenciadas por las aguas de mina como el río Selmo (Sel1 al Sel2), el río Valcarce (Val1 al Val2) o las partes bajas del Sil (Sil5 al Sil12), el manantial de Rodrigatos (6) o el manantial de Villablino (36), y por el otro lado agrupa muestras que sí están algo afectadas por aguas ácidas de mina como el río Cúa en Vega de Espinareda (Cua4), el río Sil entre Villablino y Palacios del Sil (Sil2 al Sil4), el río Boeza entre Bembibre y Ponferrada (Bo3 al Bo5), y las aguas subterráneas como la fuente a la entrada de Boeza (39) o la fuente a la entrada de Tombrío de Abajo (26a), por ejemplo.

Variables	T (°C)	pH	CE (µS/cm)	DO (mg/l)	Turb (NTU)	Eh (mV)	F- (ppm)	Cl-	NO2-	Br-	NO3-	PO43-	SO42-	Li+	Na+	NH4+	K+	Mg2+	Ca2+	HCO3- (mg/l)	Si (mg/l)
T (°C)	1																				
pH	-0.129	1																			
CE (µS/cm)	0.262	0.027	1																		
DO (mg/l)	-0.205	0.073	-0.084	1																	
Turb (NTU)	-0.006	0.062	0.322	0.122	1																
Eh (mV)	-0.154	-0.508	0.322	0.014	-0.070	1															
F- (ppm)	0.409	-0.010	0.233	0.078	0.002	-0.370	1														
Cl-	0.470	-0.146	0.188	0.081	0.024	-0.224	0.883	1													
NO2-	0.154	-0.036	0.023	0.110	0.476	-0.028	0.158	0.265	1												
Br-	0.516	-0.057	0.306	0.057	0.032	-0.300	0.843	0.787	0.173	1											
NO3-	0.308	-0.202	-0.019	-0.070	0.105	0.091	-0.031	0.239	0.377	0.082	1										
PO43-	0.130	0.035	-0.019	-0.207	-0.003	-0.012	-0.036	0.062	0.237	-0.112	0.542	1									
SO42-	0.103	-0.079	0.945	-0.056	0.320	-0.213	0.069	0.007	-0.026	0.151	-0.088	-0.088	1								
Li+	0.374	-0.017	0.322	0.053	0.035	-0.409	0.973	0.845	0.160	0.837	-0.074	-0.088	0.179	0.852							
Na+	0.534	0.028	0.301	-0.003	0.020	-0.362	0.881	0.888	0.186	0.794	0.096	-0.011	0.089	0.180	1						
NH4+	0.061	-0.191	0.177	-0.009	0.147	0.182	0.148	0.109	0.115	0.082	0.052	-0.074	0.214	0.198	0.064	1					
K+	0.384	-0.154	0.328	-0.219	0.155	-0.100	0.209	0.334	0.299	0.240	0.682	0.643	0.192	0.180	0.268	0.164	1				
Mg2+	0.137	0.006	0.964	-0.078	0.336	-0.239	0.038	-0.032	-0.023	0.130	-0.074	-0.048	0.978	0.138	0.089	0.183	0.256	1			
Ca2+	0.201	0.128	0.953	-0.079	0.332	-0.322	0.101	0.037	-0.014	0.218	-0.047	-0.008	0.921	0.197	0.159	0.116	0.322	0.943	1		
HCO3- (mg/l)	0.363	0.478	0.497	-0.132	0.141	-0.325	0.224	0.179	0.004	0.279	0.057	0.208	0.237	0.218	0.401	-0.103	0.322	0.220	0.272	0.460	1
Si (mg/l)	0.481	-0.033	0.341	-0.074	0.027	-0.157	0.555	0.488	0.094	0.542	-0.042	0.032	0.179	0.543	0.588	0.046	0.288	0.220	0.272	0.460	1
Al (µg/l)	-0.080	-0.430	0.229	0.065	0.112	0.465	0.091	0.247	-0.023	0.017	-0.054	-0.121	0.236	0.092	0.091	0.226	-0.003	0.168	0.075	-0.149	0.085
Ba	0.332	-0.027	0.108	-0.170	-0.032	0.022	-0.036	0.017	-0.015	0.042	0.213	0.157	0.030	-0.072	0.053	-0.053	0.279	0.080	0.122	0.291	0.165
Co	-0.118	-0.379	0.272	0.037	0.127	0.365	0.072	0.099	-0.024	-0.007	-0.071	-0.078	0.313	0.102	0.011	0.258	0.038	0.267	0.133	-0.145	0.043
Fe	0.152	-0.111	0.534	-0.293	0.031	-0.386	0.014	-0.022	-0.016	0.015	-0.062	-0.062	0.563	0.163	0.001	0.154	0.249	0.542	0.480	0.066	0.105
Mn	0.079	-0.256	0.717	-0.143	0.221	-0.106	0.093	0.063	-0.023	0.138	-0.093	-0.115	0.762	0.237	0.064	0.251	0.196	0.721	0.633	0.073	0.164
Ni	-0.086	-0.396	0.246	0.070	0.135	0.430	0.098	0.155	-0.017	0.010	-0.052	-0.086	0.266	0.111	0.057	0.210	0.012	0.219	0.097	-0.131	0.086
Pb	0.046	-0.175	-0.038	-0.078	-0.039	0.148	-0.012	0.014	-0.016	0.007	0.115	-0.003	-0.027	-0.005	-0.027	-0.027	0.155	-0.035	-0.043	-0.069	-0.029
Sr	0.207	0.224	0.672	-0.048	0.283	-0.340	0.181	0.136	0.006	0.200	0.002	0.071	0.552	0.189	0.386	0.046	0.051	0.627	0.629	0.598	0.229
Zn	-0.080	-0.405	0.260	0.064	0.157	0.439	0.099	0.132	-0.019	0.018	-0.032	-0.094	0.294	0.117	0.044	0.284	0.051	0.251	0.120	-0.132	0.073
As	0.396	0.027	0.155	0.093	-0.026	-0.406	0.885	0.857	0.146	0.832	-0.049	-0.073	-0.004	0.958	0.863	0.092	0.157	-0.035	0.040	0.192	0.534

Variables	Al (µg/l)	Ba	Co	Fe	Mn	Ni	Pb	Sr	Zn	As
T (°C)										
pH										
CE (µS/cm)										
DO (mg/l)										
Turb (NTU)										
Eh (mV)										
F- (ppm)										
Cl-										
NO2-										
Br-										
NO3-										
PO43-										
SO42-										
Li+										
Na+										
NH4+										
K+										
Mg2+										
Ca2+										
HCO3- (mg/l)										
Si (mg/l)	1									
Al (µg/l)	-0.047	1								
Ba	0.784	0.015	1							
Co	0.033	-0.035	0.160	1						
Fe	0.440	-0.060	0.586	0.766	1					
Mn	0.888	-0.039	0.914	0.045	0.536	1				
Ni	0.006	0.012	-0.025	-0.008	-0.011	-0.010	1			
Pb	0.015	0.151	0.016	0.175	0.227	-0.046	-0.046	1		
Sr	0.815	-0.038	0.906	0.039	0.554	0.968	0.093	0.037	1	
Zn	-0.017	-0.044	-0.036	-0.014	0.003	-0.014	-0.007	0.140	-0.016	1
As										

Tabla 2. Coeficientes de correlación de Pearson de las mediciones in situ, los elementos mayoritarios y los minoritarios frente a todas las variables (verde claro y oscuro correlación positiva, amarillo correlación negativa)

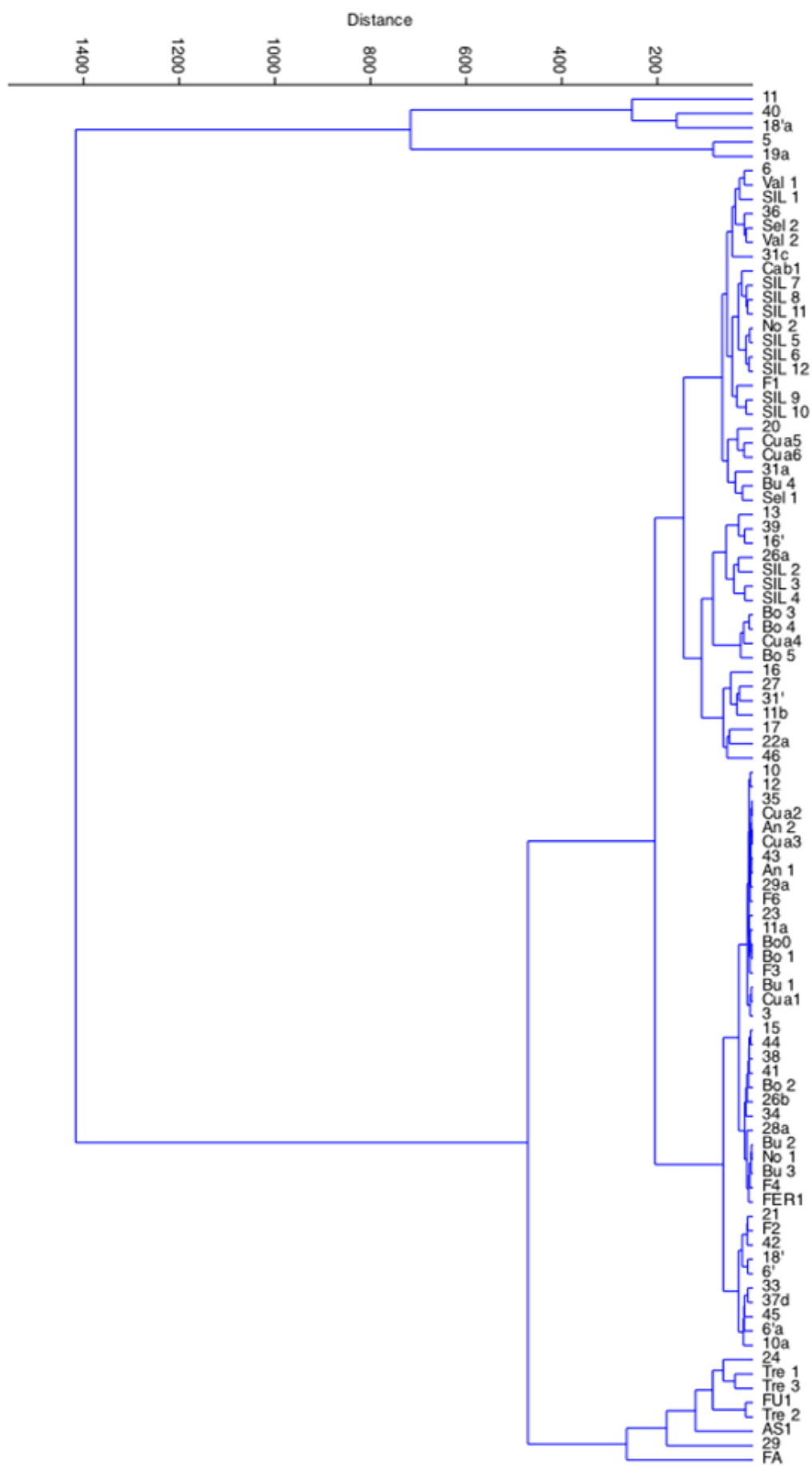


Figura 7. Análisis clúster del global de las muestras.

Por otro lado, el subgrupo 2.1.2 también se divide en otros 2 subgrupos, uno que estaría compuesto por dos grupos principales de aguas superficiales y subterráneas con similitudes que habría que estudiar más a fondo: el primero de estos subgrupos está compuesto por cabeceras de ríos como el Cúa (Cua1 al Cua3), Boeza (Bo0 al Bo1), Burbia (Bu1), o ríos completos como el Ancares (An1 y An2), y por aguas subterráneas como la fuente de la Silva (10), la fuente de Quintana de Fuseros (12) o el manantial de Peranzanes (35), entre otros; y el segundo estaría compuesto por ríos como el Boeza (Bo2), Burbia (Bu2 al Bu3), Noceda (No1) y cabecera de Tremor (FER1) y aguas subterráneas como la fuente de Tedejo (15), la fuente de Cela en la Iglesia (44) o la fuente de Noceda a Vega, al pie también de una iglesia (38); estas muestras serían zonas de ríos o cabeceras que parecen no estar afectadas por aguas de mina y con una composición característica que las diferencia de las otras. Y el último subgrupo, compuesto solo por aguas subterráneas como el manantial de las tripas en Venta de Alvares (21), la fuente de Caboalles de Arriba (F2), la fuente Cangalón a la entrada de Fabero (33) o la fuente Fondosín en Corbón del Sil (37d), grupo de aguas subterráneas que, si bien parecieran no estar directamente afectadas por aguas de mina, si estarían mineralizadas por las cuencas carboníferas de la zona.

Conclusiones

Con todo lo visto en este trabajo, podemos concluir que existen evidencias claras de la afección de las aguas ácidas de mina procedentes de escombreras y bocaminas, con mayor influencia sobre las aguas superficiales, pero también sobre aguas subterráneas.

Parece también que, en vista de los resultados en estudios anteriores donde se reflejaba la contaminación en puntos de aguas superficiales y solamente de manera puntual en las subterráneas, podríamos decir que es más probable que la contaminación se está agravando en algunos puntos (el hecho de tener bocaminas drenando constantemente aguas ácidas de mina hacia arroyos y ríos está contaminando con metales pesados y sulfuros a las aguas superficiales).

La conectividad con las aguas subterráneas está haciendo que estas también se resientan en el tiempo a pesar de que en un principio se trata de aguas de recorrido corto al tratarse de acuíferos de poca entidad que circulan preferentemente por fracturas según muestra el plan hidrológico de cuenca.

En algunas zonas se aprecia cierta atenuación por procesos naturales debida a los propios ecosistemas y/o por dilución por aportes de ríos y arroyos con aguas limpias con o sin bicarbonatos que pueden diluir o incluso amortiguar la acidez.

De este estudio también se resalta la necesidad de hacer un nuevo inventario actualizado de los puntos de lixiviado que están, a día de hoy, aportando aguas ácidas de mina; también es importante su caracterización, así como un estudio más profundo de las aguas subterráneas de la zona para conocer la hidrodinámica y la hidroquímica de los acuíferos principales, así como su conectividad entre ellos, con las aguas superficiales y con las propias galerías de minas abandonadas.

Bibliografía

- Aduvire, O. (2006). *Drenaje ácido de mina. Generación y tratamiento*. Informe inédito, Centro Documental del Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, 136 pp.
- AENOR (2000). *UNE-EN ISO 14911:2000. Calidad del agua. Determinación de los iones Li⁺, Na⁺, NH₄⁺, K⁺, Mn²⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Sr²⁺, Ba²⁺ disueltos por cromatografía iónica. Método aplicable al agua y agua residual. (ISO 14911:1998)*. AENOR, Madrid.
- AENOR (2010). *UNE-EN ISO 11885:2010. Calidad del agua. Determinación de elementos seleccionados por espectrometría de emisión óptica de plasma acoplado inductivamente (ICP-OES) (ISO 11885:2007)*. AENOR, Madrid.

- AENOR (2012). *UNE-EN ISO10304-1:2009/AC:2012. Calidad del agua - Determinación de aniones disueltos por cromatografía líquida de iones - Parte 1: Determinación de bromuro, cloruro, fluoruro, nitrato, nitrito, fosfato y sulfato - Corrección técnica 1 (ISO 10304-1:2007/Cor 1:2010)*. AENOR, Madrid.
- AENOR (2024a). *UNE-EN ISO 5667-1:2024. Calidad del agua. Muestreo. Parte 1: Guía para el diseño de programas de muestreo y técnicas de muestreo. (ISO 5667-1:2023)*. AENOR, Madrid.
- AENOR (2024b). *UNE-EN ISO 5667-3:2024. Calidad del agua. Muestreo. Parte 3: Conservación y manipulación de las muestras de agua. (ISO 5667-3:2024)*. AENOR, Madrid.
- BOE (2023). *Real Decreto 3/2023, de 10 de enero, por el que se establecen los criterios técnico-sanitarios de la calidad del agua de consumo, su control y suministro*. <https://www.boe.es/eli/es/rd/2023/01/10/3>
- Calleja Arriero, B., González Trabanco, C., Escartín Hernández, C.M., Magdaleno Más, F., Núñez Muñoz, J.L., Aláñez Rodríguez, J., Acacio Sánchez, L. y Garrido Sobrado, L. (2021). *Guía para la evaluación del estado de las aguas superficiales y subterráneas*. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, Dirección General del Agua, Madrid, 355 pp.
- C.H. del Miño-Sil (2022). *Plan hidrológico del ciclo 2022-2027. Parte española de la Demarcación Hidrográfica del Miño-Sil*. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, Confederación Hidrográfica del Miño-Sil, O.A., Ourense, 361 pp.
- de la Losa, A., Moreno, L. y Núñez, I. (2010). Calidad química de las aguas subterráneas en una zona de actividad minera (Cuenca del Bierzo- León). *Boletín Geológico y Minero*, 121 (1), 103-122.
- de la Losa Román, A.M., Moreno Merino, M. y Núñez Monasterio, I. (2008). *Calidad química de las aguas subterráneas en una zona de actividad minera (Cuenca del Bierzo)*. Informe inédito, Centro Documental del Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, 20 pp.
- De Soto, J., Fernández-Aláez, M., Luis-Calabuig, E. y Fernández-Aláez, C. (1994). Spatial and temporal distribution of the caddisfly (Trichoptera) communities of the Sil basin (NW Spain). *SIL Proceedings*, 25 (3), 1716-1722. DOI: <https://doi.org/10.1080/03680770.1992.11900475>
- Fernández García, L.G., Moro Gómez, C., Gómez Prieto, J.A. y Álvarez del Campo, C. (1984). *Revisión y síntesis geológico-minera de la cuenca carbonífera de "El Bierzo" (León)*. Informe inédito n.º 11101, Centro Documental del Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, 98 pp.
- Fernández-Aláez, C., Soto, J. de, Fernández-Aláez, M. y García-Criado, F. (2002). Spatial structure of the caddisfly (Insecta, Trichoptera) communities in a river basin in NW Spain affected by coal mining. *Hydrobiologia*, 487, 193-205.
- García Álvarez, A. y Cantó Portillo, F., eds. (2010). *Plan Director para la restauración edafopaisajística y recuperación ambiental de los espacios degradados por la minería del carbón en la comarca de El Bierzo*. Fundación Ciudad de la Energía, Centro de Investigaciones energéticas, Medioambientales y Tecnológicas, 276 pp.
- García Criado, F. (1999). *Impacto de la minería del carbón sobre Hydraenidae y Elmidae (Coleoptera) en la cuenca del río Sil (León, España)*. Tesis doctoral, Universidad de León.
- García-Criado, F., Fernández-Aláez, C. y Fernández-Aláez, M. (1999a). Environmental variables influencing the distribution of Hydraenidae and Elmidae assemblages (Coleoptera) in a moderately-polluted river basin in north-western Spain. *European Journal of Entomology*, 96 (1), 37-44.

- García-Criado, F., Tomé, A., Vega, F.J. y Antolín, C. (1999b). Performance of some diversity and biotic indices in rivers affected by coal mining in northwestern Spain. *Hydrobiologia*, 394, 209-217. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1003634228863>
- Gómez Fernández, E. (1990). *Estudio del drenaje de aguas ácidas en actividades mineras del carbón en la provincia de León*. Tesis doctoral, Universidad de León, 284 pp.
- Herrero Barrero, T. (2014). *Impacto de los drenajes ácidos en los ecosistemas acuáticos producidos por la minería del carbón en El Bierzo: bioacumulación de metales pesados y evolución de las comunidades biológicas*. Tesis Doctoral, Universidad de León, 402 pp. DOI: <http://dx.doi.org/10.18002/10612/3518>
- IGME (1983). *Actualización del Inventario de Recursos Nacionales de Carbón. Zona del Bierzo*. Informe inédito n.º 10912, Centro Documental del Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, 595 pp.
- Luis Calabuig, E. de, Fernández-Aláez, M.C. y Fernández-Aláez, M. (1990). Calidad de las aguas de la cuenca leonesa del Sil. *Estudios Bercianos*, 13, 104-117.
- Rodríguez Gómez, V., Vadillo Fernández, L., Lacal Guzmán, M., Alberruche del Campo, E., Herrero Barrero, T. y de la Losa Román, A. (2010). Atenuación natural y calidad ambiental de los ríos mineros de la Cuenca Carbonífera del Bierzo (León). *Boletín Geológico y Minero*, 121 (1), 89-102
- USGS (2018). *National Field Manual for the Collection of Water-Quality Data*. U.S. Geological Survey, Techniques of Water-Resources Investigations, 9.
- Vadillo, L., Rodríguez, V., Alberruche, E., Aduvire, O., Lacal, M., Monteserin, V. e Iribarren, I. (2010). Environmental Impacts of the A6 Highway in La Silva Stream in the Region of Bierzo. (Leon). Spain. En: *Highway and Urban Environment* (Rauch, S., Morrison, G., Monzón, A., eds.), Alliance for Global Sustainability Bookseries, 17, Springer, Dordrecht, 275-283. DOI: https://doi.org/10.1007/978-90-481-3043-6_30
- Vadillo Fernández, L., Aduvire Pataca, O., Alberruche del Campo, M. E., Arranz González, J.C., Lacal Guzmán, M., Martínez Plédel, B. y Moreno Gutiérrez, C. (2006). *Acuerdo específico de colaboración entre el centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT) y el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) para la restauración ambiental de la región del Bierzo*. Informe inédito, Centro Documental del Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, 120 pp.

Para citar este artículo:

García García, D.A. (2026). Agua y minería en El Bierzo y Laciana. Una primera aproximación al estado de las masas de agua y su posible afección por el abandono de la minería de carbón. *GeoLaciana* 2026, artículo 1.