

Caracterización hidroquímica de un pequeño manantial del macizo granítico de A Coruña (NW España)

Hydrochemical characterization of a small spring located at the granitic massif of A Coruña (NW Spain)

RODRÍGUEZ BLANCO, M. L.¹; TABOADA CASTRO, M. M.¹
& TABOADA CASTRO, M. T.¹

Abstract

This work presents the hydrochemical characterization of a spring that surfaces at the granitic massif of A Coruña (NW Spain). Firstly, content of major ions and the relations among these was analyzed, using the results obtained from three sampling trials. Secondly, predominate hydrochemical facies were determined using the Piper diagram, considering part of the samples collected in the last sampling trial.

The water of the spring is characterized as having low mineralization and soft character, the predominant facies being of chlorinated-sulfated sodium-calcium type. As for its quality for agricultural use, it is within the C2-S1 group, that is, waters that present medium danger of salinization and low of alkalization.

Key words: Hydrochemical facies, spring, granitic massif, A Coruña, NW Spain.

(1) Facultad de Ciencias, Universidad de A Coruña. A Zapateira, 15071 A Coruña, España. E-mail: teresat@udc.es

INTRODUCCION

La composición natural del agua subterránea es el resultado de la interacción de distintos factores, entre los que se encuentran la composición del agua atmosférica, las características del suelo, la naturaleza geológica del acuífero y el funcionamiento hidrogeológico de la formación (HEM, 1970; FREEZE & CHERRY, 1979). Los tres primeros determinan los tipos de componentes químicos presentes, y el último condiciona la capacidad del flujo hídrico, las características del flujo subterráneo y el tiempo de residencia del agua en el acuífero (MOPTMA-MINER, 1994).

A grandes rasgos, existen tres ámbitos de incorporación de componentes químicos a las aguas subterráneas: atmósfera, zona no saturada y zona saturada. El agua durante su recorrido por la atmósfera interactúa con los gases atmosféricos, así como con los aerosoles, polvo y sales de diversa procedencia, configurándose la composición química del agua de infiltración.

Durante la infiltración del agua superficial, se van incorporando sales solubles presentes en el suelo como cloruros, nitratos y sulfatos de metales alcalinos y alcalinotérreos. La composición química del agua edáfica es el resultado de su interacción con las partículas minerales (especialmente a través de procesos de intercambio iónico) y con el aire del suelo, donde se encuentran gases tales como CO_2 (en concentraciones incluso 1000 veces superiores a las de la atmósfera), O_2 , N_2 , NH_3 , CH_4 y SH_2 , procedentes del metabolismo o de la descomposición de microorganismos, plantas y animales.

Por último, la tercera zona donde el agua adquiere su quimismo es a nivel de la zona saturada. El agua subterránea tiene su origen en la infiltración del agua superficial, lo cual hace que varíe su composición química, enriqueciéndose en elementos minerales y empobreciéndose en materia orgánica. En las aguas subterráneas se encuentran principalmente: Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} y HCO_3^- , contenido que está controlado por la evolución de estos elementos en el suelo y rocas a través de las cuales circula el agua, por las reservas geoquímicas y procesos geológicos (FREEZE & CHERRY, 1979). Durante el flujo subterráneo puede sufrir una evolución geoquímica como consecuencia de una serie de procesos químicos y biológicos, como la reducción de sulfatos, intercambio iónico, oxidación-reducción, procesos de concentración, hidrólisis y precipitación e intercambio de bases (HELENA SOTO, 1997).

Otro aspecto a considerar en la evolución geoquímica de las aguas subterráneas, es que el tiempo de contacto entre el agua y los materiales por los que circula son variables, tanto mayores cuanto mayor sea la profundidad y menor la permeabilidad. Por estas causas, las aguas más profundas están más mineralizadas. Las aguas con circulación local (recorrido subterráneo corto) interactúan poco con el terreno y mantienen la composición adquirida durante la infiltración, salvo que se produzca concentración o evaporación o que existan litofacies que aporten sales fácilmente o se mezclen con aguas subterráneas profundas (AGUEDA, 1997).

En Galicia hay una enorme proliferación de fuentes, manantiales y capturas de agua en general de bajo caudal, especial-

mente en la época estival. Estos recursos son de vital importancia a consecuencia de la diseminación de la población, sirviendo para abastecimiento de granjas, viviendas unifamiliares e incluso pequeños núcleos urbanos.

En este trabajo se efectúa la caracterización hidroquímica de un manantial que aflora en el macizo granítico de A Coruña (NW España), tratando de contribuir al conocimiento de los recursos subterráneos de la Comunidad Gallega. En primer lugar se realiza una caracterización global del agua en base al contenido en iones mayoritarios y se analizan las relaciones existentes entre ellos, partiendo de los resultados obtenidos durante tres campañas de muestreo. En segundo lugar, se determina la facies hidroquímica predominante haciendo uso del diagrama de Piper, considerando parte de las muestras recogidas en la última campaña de muestreo. Finalmente se evalúa la calidad del agua para riego.

CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

Marco geográfico y geológico

El enclave en el que se encuentra el manantial pertenece a los Montes de A Zapateira, localizados en la zona elevada del macizo granítico de A Coruña (figura 1). Este macizo granítico, con una extensión del orden de 150 Km², ha sido estudiado desde el punto de vista estructural y morfológico por DE UÑA ALVAREZ (1986). Se encuadra en la Zona Centro-Ibérica establecida por LOTZE (1945), y en la Zona IV (Galicia Media-Tras os

Montes) de MATTE (1968). Está incluido en la zona oeste de las hojas 21 (A Coruña) y 45 (Betanzos) del IGME (1975, 1981). Limita al norte con el Océano Atlántico y al sur con la falla de Meirama, mientras que al este y al oeste está en contacto con el Complejo de Órdenes.

Desde el punto de vista del relieve, el manantial (8° longitud oeste y 42° de latitud norte) se encuentra dentro de la unidad que constituye el "litoral" (alturas inferiores a 200 m), a una altura de 115 metros sobre el nivel del mar. Se ubica en una zona de ladera cuya pendiente es del orden del 15%, encuadrándose dentro de la clase 4 (13-25%: moderadamente escarpado) de la FAO (1968).

Las formas y paisajes graníticos en Galicia han sido ampliamente estudiadas por VIDAL ROMANÍ (1989) y VIDAL ROMANÍ & TWIDALE (1998), entre otros. En el macizo granítico de A Coruña afloran tres tipos de rocas, que por orden de antigüedad son: granodiorita precoz, granito de dos micas deformado y granodiorita tardía (IGME, 1981), constituyendo esta última el material sobre el que se asienta el manantial estudiado. La granodiorita tardía está emplazada de forma más o menos geométrica en el material granodiorítico precoz (figura 1).

La granodiorita tardía presenta tamaño de grano grueso, con megacristales de feldespato potásico más pequeños que la precoz. Microscópicamente se caracteriza por texturas de tipo alotriomórfico o hipidiomórfico de grano grueso y muy raramente orientadas. Mineralógicamente no muestra grandes diferencias con la precoz, excepto en que generalmente, existe un predominio de la moscovita sobre la bioti-

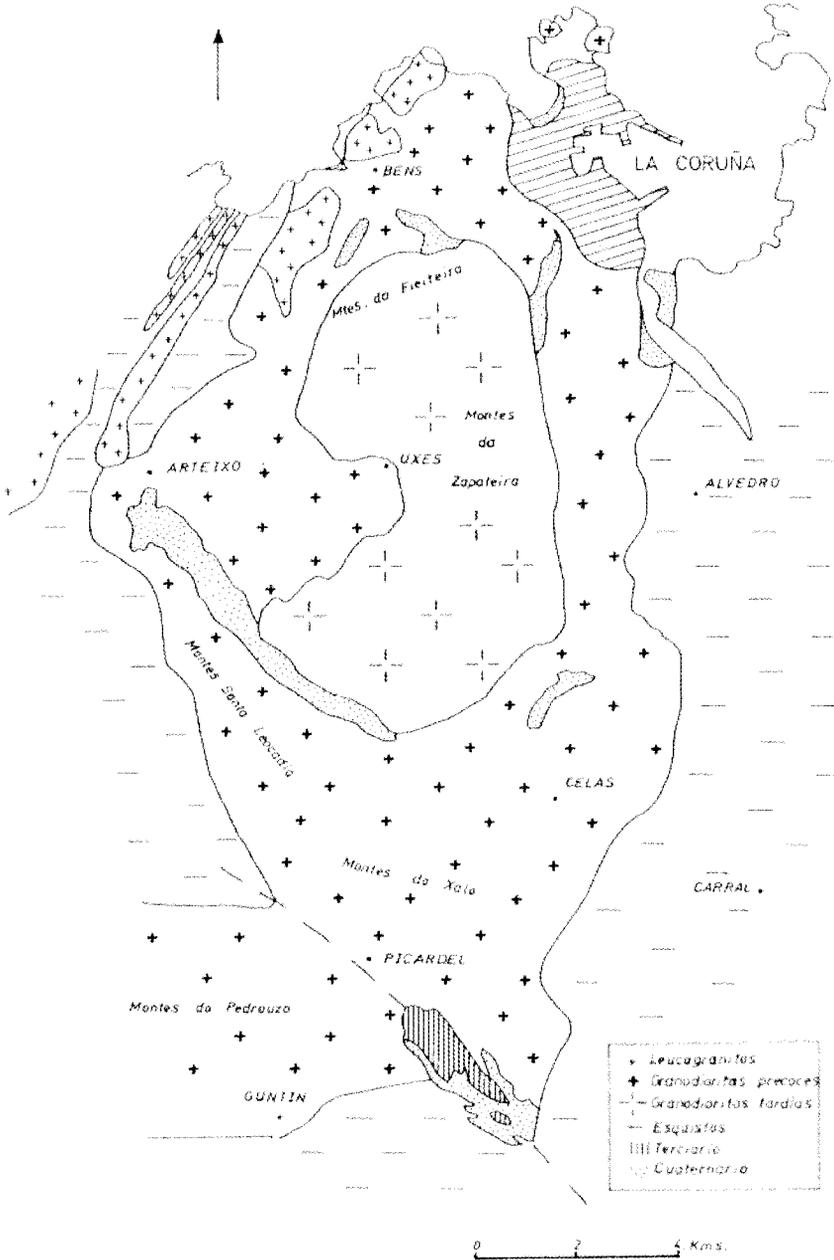


Figura 1. Situación geográfica y geológica de la zona de toma de muestra (Montes de A Zapateira en el Macizo Granítico de A Coruña).

ta y del feldespato potásico (microclina) sobre las plagioclasas (IGME, 1981), siendo sus componentes esenciales cuarzo, microclina, plagioclasa sódica y moscovita. Sin embargo, cabe señalar que frente a esa composición más general, algunos análisis puntuales presentaron un predominio de plagioclasa sobre microclina y de biotita sobre moscovita (DE UÑA ALVAREZ, 1986).

Desde el punto de vista químico, ambos tipos de granodioritas son muy similares. Se caracterizan por un elevado contenido de SiO_2 , que en algunos casos alcanza el 74%. El segundo componente más abundante es el Al_2O_3 , tanto más cuanto mayor es el contenido de moscovita. En cuanto a los álcalis, predomina el K_2O sobre el Na_2O . El calcio es un componente muy escaso. Generalmente la tardía es más pobre en CaO , FeO y Fe_2O_3 , TiO_2 y MgO , puesto que la mica dominante suele ser moscovita, como se indicó anteriormente. La presencia de esta mica, junto con el mayor contenido en feldespato potásico las hace más resistentes a la meteorización que las precoces.

Las características hidrogeológicas están fuertemente condicionadas por la litología y tectónica (fracturas, diaclasas, etc...) de los materiales existentes. El Mapa Hidrogeológico de Galicia (XUNTA DE GALICIA, 1999), realizado en función del grado cualitativo de permeabilidad de las rocas que forman el sustrato gallego, define tres unidades hidrogeológicas dentro de la provincia de A Coruña: unidades de permeabilidad media, baja y muy baja. Atendiendo a esta división, las granodioritas de la zona de estudio, se engloban dentro de la unidad

de permeabilidad baja, de modo que las posibilidades de acumulación de agua se reducen a las zonas de fractura (IGME, 1981). En este sentido cabe señalar que el manantial objeto de estudio posee un caudal muy reducido. Medidas puntuales efectuadas por RODRÍGUEZ BLANCO (2003) durante el periodo comprendido entre febrero y diciembre del año 2002, reflejaron un valor medio de 0,44 L/s, similares a los de otros manantiales gallegos sobre granodioritas (SAMPER, 2000).

Climatología

En términos generales la provincia de A Coruña se caracteriza por un clima con temperaturas suaves (10,7 °C a 16,2 °C de media anual), con una importante influencia oceánica que determina una oscilación térmica relativamente baja (del orden de 10 °C) que se incrementa hacia el interior, una escasez de heladas (prácticamente ausentes en el litoral) y una elevada humedad relativa (CARBALLEIRA *et al.*, 1983; MARTÍNEZ CORTIZAS, 1987).

Para caracterizar la precipitación de la zona de estudio, se usaron datos de la estación meteorológica del aeropuerto de Alvedro, publicados por el Centro Meteorológico Territorial de Galicia. Se dispone de datos de precipitación mensual media del periodo comprendido entre los años 1961 y 1992. En esta etapa la precipitación media anual ascendió a 1171 mm. Comparando este valor con las precipitaciones totales de los años en los que se efectuó el estudio (1997, 1998, 1999, 2000, 2002) se observó que el año 2000 fue el que presentó los valores más elevados (1451.5 mm) y el 1998 el más seco (1046 mm).

Usos del suelo y vegetación

En la ladera del manantial el proceso característico de formación de suelos es una alteración en medio ácido sobre un material rico en minerales resistentes (cuarzo y moscovita) y minerales lentamente alterables (microclina), lo que en general da lugar a suelos de escasa profundidad (perfil característico de tipo AR) y textura gruesa, confiriéndole baja capacidad de retención de agua.

Respecto a los usos, el conjunto de la zona de A Zapateira es un monte de eucaliptos y tojos fundamentalmente, en el que cada vez son más frecuentes las urbanizaciones y las viviendas unifamiliares, que en algún caso no disponen de alcantarillado. También son importantes las áreas escolares y el Campus Universitario y escasas las parcelas dedicadas a cultivo. Los puntos de muestreo se ubican en un área de la ladera dedicada a monte de eucaliptos, con algún pino disperso y abundante matorral bajo formado básicamente por tojos.

MATERIAL Y MÉTODOS

Se tomaron muestras de agua manualmente en dos puntos: P1 y P2. El punto P2 corresponde al manantial propiamente dicho, mientras que el P1 se sitúa ladera abajo, aproximadamente a unos 50 m de distancia del anterior. Desde el punto P2 hasta el P1, el agua fluye superficialmente. En ambos puntos las muestras se recogieron en superficie con un intervalo de muestreo variable.

En P1 se analizaron 163 muestras, que corresponden a tres campañas de mues-

treo: 1) C1: noviembre 1997-marzo 1998 (46 muestras), 2) C2: febrero-junio 2000 (36 muestras) y 3) C3: febrero-diciembre 2002 (81 muestras). Durante las dos primeras se determinaron los iones mayoritarios Ca^{2+} , Na^+ , K^+ , NO_3^- y Cl^- así como pH y conductividad eléctrica (CE) mediante la Sonda Multiparamétrica Hydrión-10 (DIÉGUEZ VILLAR, 1998; TABOADA *et al.*, 2000). En la tercera campaña además de los parámetros señalados (excepto conductividad eléctrica) se analizaron: SO_4^{2-} por electroforesis capilar y Mg^{2+} por ICP-MS. Entre el 6 de mayo y 15 de julio de 2002 se analizaron HCO_3^- y sólidos disueltos en 25 muestras.

En el transcurso de esta tercera campaña se efectuaron medidas puntuales de caudal (por triplicado) mediante el método voluminal, que consiste en el llenado de un recipiente graduado colocado bajo la corriente de agua. El caudal se calcula dividiendo el volumen de agua del recipiente entre el tiempo de llenado.

En el punto P2 se tomaron 11 muestras entre el 6 de mayo y el 15 de julio de 2003. Se analizaron: pH, CE, Ca^{2+} , Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , NO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , HCO_3^- y sólidos disueltos (TSD) de la misma forma que en P1.

Para efectuar la caracterización química general se consideran las 163 muestras del punto P1, mientras que para conocer la facies hidroquímica sólo se tienen en cuenta las 36 muestras recogidas entre el 6 de mayo y el 15 de julio de 2002 (25 del punto P1 y 11 del punto P2), por ser las únicas que disponen de análisis completos a tal efecto.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Evolución temporal de precipitación y caudal

En la figura 2 se muestra la evolución temporal del caudal medido en el punto P1 durante la toma de muestras de la tercera campaña frente a la precipitación. Se observa que entre ambos parámetros existe una relación positiva, es decir, el caudal aumenta con el incremento de precipitación, lo que indica que estas ejercen una gran influencia en el régimen hídrico del manantial. Los caudales obtenidos oscilan entre un valor mínimo de 0.12 L/s de la época estival hasta 0.98 L/s medidos después de unas fuertes lluvias otoñales. Pese a los bajos valores de caudal de la estación seca, el manantial no llegó a desaparecer

en verano, contrariamente a lo que suele ocurrir en otros pequeños manantiales de la Comunidad Gallega durante dicha estación (SAMPER, 2000).

Características físico-químicas y análisis de su correlación

En las tablas 1 y 2 se presenta un breve resumen de los parámetros analizados en cada campaña de muestreo. Un análisis más detallado de estos datos se encuentra en RODRÍGUEZ BLANCO (2003). A partir de los datos de la tabla 1 se puede indicar que el agua del manantial tras circular durante una corta distancia por la superficie del suelo presenta un valor de pH ligeramente superior a la neutralidad, con valores de conductividad eléctrica inferiores a 333 $\mu\text{S}/\text{cm}$, indicativos de un

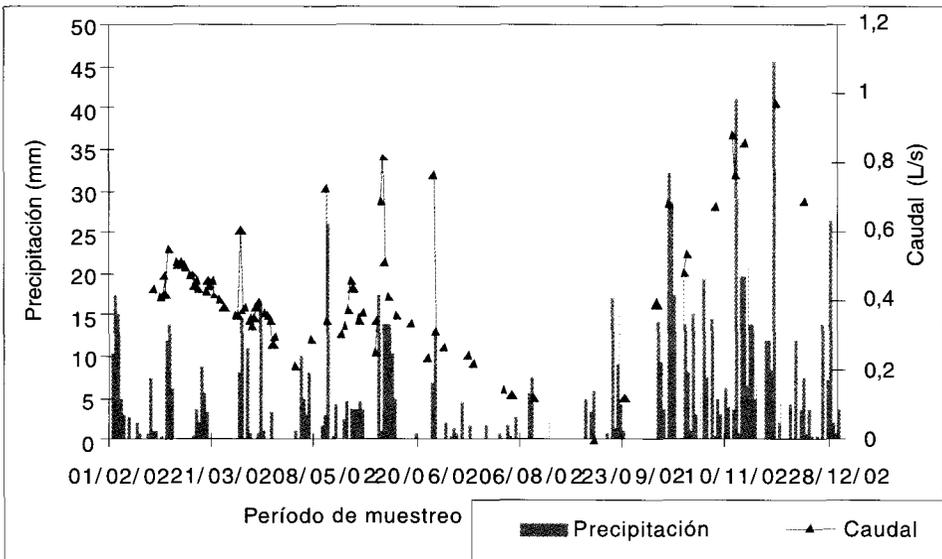


Figura 2. Evolución temporal del caudal en el punto P1 durante la tercera campaña de muestreo.

	pH			CE ($\mu\text{S/cm}$)		NO_3^- (mg/L)			Cl^- (mg/L)			SO_4^{2-} (mg/L)
	C1	C2	C3	C1	C2	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C3
Media	7,41	7,43	7,35	273,78	255,67	29,41	31,83	35,16	29,88	33,88	28,63	38,83
Mediana	7.41	7.39	7.34	271.00	256.00	28.60	31.20	36.90	29.15	34.10	28.10	38.50
Desv. Est.	0.10	0.13	0.20	9.29	4.39	3.24	2.28	4.33	3.08	3.41	2.11	1.69
Varianza	0.01	0.02	0.04	86.40	19.26	10.52	5.18	18.79	9.48	11.65	4.43	2.85
Mínimo	7.13	7.13	6.80	243.00	243.00	23.10	27.70	20.10	25.10	27.40	24.60	33.60
Máximo	7.64	7.71	7.80	294.00	263.00	37.9	38.00	40.90	37.90	41.80	38.40	44.60
Nº muestras	46	36	81	46	36	46	36	81	46	36	81	81

Tabla 1. Resumen estadístico de pH, conductividad eléctrica y aniones analizados en P1 en las diferentes campañas.

	Ca^{2+} (mg/L)			Na^+ (mg/L)			K^+ (mg/L)			Mg^{2+} (mg/L)
	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C3
Media	21.44	19.06	20.04	20.80	20.23	20.63	2.33	2.13	2.94	6.01
Mediana	22.10	19.20	22.00	20.70	20.35	21.30	2.32	2.22	3.00	5.90
Desv. est.	3.61	1.86	4.00	20.70	20.20	19.00	0.24	0.60	0.55	0.59
Varianza	13.07	3.44	15.97	3.70	0.85	2.53	0.06	0.36	0.30	0.35
Mínimo	11.90	11.50	8.77	13.80	16.40	13.60	1.57	0.48	1.47	5.30
Máximo	31.10	22.00	24.80	29.80	21.30	26.00	3.02	2.99	5.04	7.90
Nº muestras	46	36	81	46	36	81	46	36	81	81

Tabla 2. Resumen estadístico de los cationes analizados en P1 durante las diferentes campañas.

contenido salino de las aguas de medio a bajo, tal como cabe esperar por la mineralogía silicatada de estas rocas duras. Estas observaciones son acordes, entre otras, con las de SORIANO y SAMPER (2000), MORATILLA & YÉLAMOS (2000) para aguas subterráneas de materiales geológicos similares a los del área de estudio y con las de MARTINS CAR-

VALHO *et al.* (2000) en aguas que transitan por materiales graníticos, los cuales obtuvieron valores de conductividad inferiores a 150 $\mu\text{S/cm}$.

Las concentraciones medias de cloruros oscilan entre 28.63 mg/L de la tercera campaña y 33.88 mg/L de la segunda. El contenido medio de nitratos osciló entre 29.41 y 35.16 mg/L de la primera y

tercera campaña respectivamente. Los sulfatos oscilaron entre 33.60 y 44.60 mg/L, situándose la media en 38.83 mg/L, contenido que es generalmente más elevado que el de las aguas de la zona norte y noroeste de Galicia (XUNTA DE GALICIA, 1991). Las mayores diferencias se producen en el contenido en NO_3^- , presentando el agua del manantial concentraciones significativamente más altas que en las aguas procedentes de las regiones norte y noroeste.

Calcio y sodio muestran valores medios del orden de 20 mg/L en las tres campañas (tabla 2), los cuales superan a los valores de las aguas muestreadas en la zona noroeste de la comunidad gallega (XUNTA DE GALICIA, 1991). Con valores promedio muy inferiores se sitúa el potasio, del orden de 2 mg/L. Las concentraciones de magnesio oscilaron en la tercera campaña entre 5.30 y 7.90 mg/L, obteniéndose como valor medio 6.01 mg/L. Estos valores se sitúan ligeramente por encima de los 4 mg/L encontrados en aguas de la zona norte y noroeste de Galicia (XUNTA DE GALICIA, 1991).

En las tablas 3, 4 y 5 se presentan las matrices de correlación lineal entre los distintos parámetros analizados en cada campaña. Como se puede observar en la tabla 3, en la primera campaña se obtuvo una correlación altamente significativa ($p < 0.01$) y positiva entre CE- NO_3^- y CE- Na^+ , así como significativa al 0.05 entre CE- Ca^{2+} , indicando que estos tres iones son los principales implicados en la mineralización del agua. Sin embargo, la CE muestra correlación negativa con el pH, y este con los NO_3^- . La relación negativa entre pH- NO_3^- podría atribuir-

se a la liberación de protones durante el proceso de nitrificación, los cuales harían disminuir los valores de pH. El Na^+ se correlaciona con el Ca^{2+} y el K^+ , así como con los nitratos.

En la segunda campaña (tabla 4) se observó una buena correspondencia entre NO_3^- y Cl^- , así como únicamente entre estos dos y la CE, sugiriendo que son estos los principales iones implicados en la mineralización del agua.

El pH se correlacionó negativamente con el Ca^{2+} . FRENGSTAD *et al.* (2001) en sus estudios sobre la dependencia del pH en la concentración de elementos en aguas subterráneas en rocas cristalinas, atribuye la correlación negativa entre pH y Ca^{2+} a que este se incrementa a bajos pH debido a la meteorización de carbonatos y feldspatos, mientras que a elevados pH decrece a causa de la precipitación de la calcita o de los cationes de intercambio. También mostraron correlaciones positivas Ca^{2+} y Na^+ .

En la tercera campaña se puede comprobar a la vista de la tabla 5 la correspondencia establecida entre el caudal y un buen número de elementos estudiados, lo que advierte de la influencia de este en la variabilidad de la composición del agua. La correlación positiva entre el SO_4^{2-} con el caudal indica que las concentraciones de este ión se incrementan cuando lo hace el caudal. La pauta contraria la ofrecen el K^+ , NO_3^- y pH con correlaciones negativas con el caudal. El pH se correlacionó positivamente con el Mg^{2+} y con el Cl^- y mantuvo la relación inversa con el Ca^{2+} . El Cl^- presentó correlación positiva con el SO_4^{2-} y con el Mg^{2+} y negativa con el Ca^{2+} . También se obtuvo una correlación positi-

	CE	pH	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻
CE	1						
pH	-0.386**	1					
K ⁺	0.114	0.130	1				
Na ⁺	0.405**	-0.248	0.304*	1			
Ca ²⁺	0.374*	-0.088	0.199	0.386**	1		
Cl ⁻	-0.275	0.265	-0.032	-0.077	-0.287	1	
NO ₃ ⁻	0.811**	-0.442**	0.168	0.426**	0.229	-0.207	1

** La correlación es significativa al nivel 0.01

* La correlación es significativa al nivel 0.05

Tabla 3. Correlación entre los diferentes parámetros analizados en el punto P1 durante la primera campaña.

	CE	pH	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻
CE	1						
pH	0.074	1					
K ⁺	0.197	0.032	1				
Na ⁺	0.100	-0.156	0.287	1			
Ca ²⁺	0.029	-0.563**	0.279	0.709**	1		
Cl ⁻	0.553**	0.067	0.215	-0.143	-0.100	1	
NO ₃ ⁻	0.568**	0.021	0.065	-0.511**	-0.252	0.594**	1

** La correlación es significativa al nivel 0.01

* La correlación es significativa al nivel 0.05

Tabla 4. Correlación entre los parámetros analizados en P1 durante la segunda campaña.

	Caudal	pH	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	Na ⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Ca ²⁺
Caudal	1								
pH	-0.455**	1							
Cl ⁻	-0.21	0.244*	1						
SO ₄ ²⁻	0.313**	-0.195	0.296**	1					
NO ₃ ⁻	-0.333**	0.200	0.087	-0.054	1				
Na ⁺	-0.139	-0.143	0.078	-0.215	-0.029	1			
Mg ²⁺	-0.222	0.449**	0.257*	0.086	0.069	-0.301*	1		
K ⁺	-0.411**	0.209	0.201	-0.272*	0.259*	-0.091	0.260*	1	
Ca ²⁺	-0.070	-0.528**	-0.339**	-0.080	-0.019	0.670**	-0.515**	-0.140	1

** La correlación es significativa al nivel 0.01

* La correlación es significativa al nivel 0.05

Tabla 5. Correlación entre los parámetros analizados en P1 durante la tercera campaña.

va del K^+ con los NO_3^- y con el Mg^{2+} y negativa con los sulfatos. El calcio sigue mostrando relación positiva con el Na^+ . Sin embargo, es negativa entre Ca^{2+} y Mg^{2+} y entre Mg^{2+} y Na^+ .

Caracterización hidroquímica

La caracterización hidroquímica se ha realizado utilizando los análisis completos de 36 muestras tomadas en el período comprendido entre el 6 de mayo y el 15 de julio de 2002 (25 de P1 y 11 de P2) como se indicó anteriormente.

En las figuras 3 y 4 se representan los resultados de sólidos disueltos (TSD) y dureza, los cuales manifiestan, una vez más, que se trata de aguas de mineralización débil y carácter blando. El contenido promedio en TSD se sitúa en 174.09 mg/L oscilando entre 146 y 217.3 mg/L. Por lo que respecta a la dureza, posee entre 45.3 y 74.3 mg/L de $CaCO_3$.

Con fin de conocer la facies dominante en el agua muestreada, los resultados analíticos se han representado sobre el diagrama de Piper (figura 5).

A la vista de dicho diagrama se observa que predomina la facies clorurada-sulfatada sódica-cálcica (50% de las muestras), obteniéndose otras relaciones composicionales, que quedan determinadas en la tabla 6.

El Na^+ constituye el catión principal, encontrándose como elemento mayoritario en el 72.2 % de las muestras, siendo su fuente esencial la meteorización de las plagioclasas. El Cl^- por su parte, aparece como anión más notable en el 66,6 %. Algunos autores que han llevado a cabo estudios en aguas subterráneas sobre material granodiorítico en Galicia, las clasifican como aguas de carácter clorurada sódica (SORIANO & SAMPER, 2000). Otros como LEITÃO & LOBO-FERREIRA (2000) en estudios realizados en aguas subterráneas que discurren por terrenos

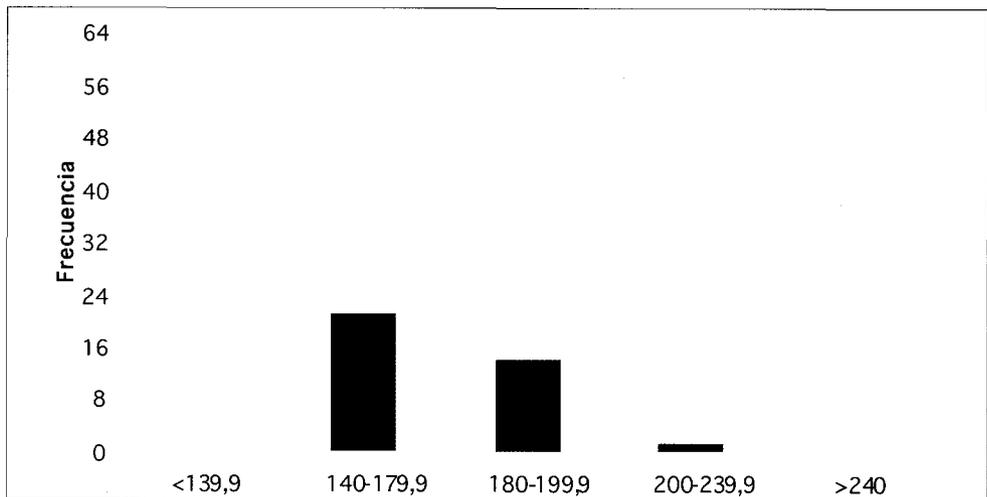


Figura 3. Distribución de frecuencias de sólidos disueltos (mg/L).

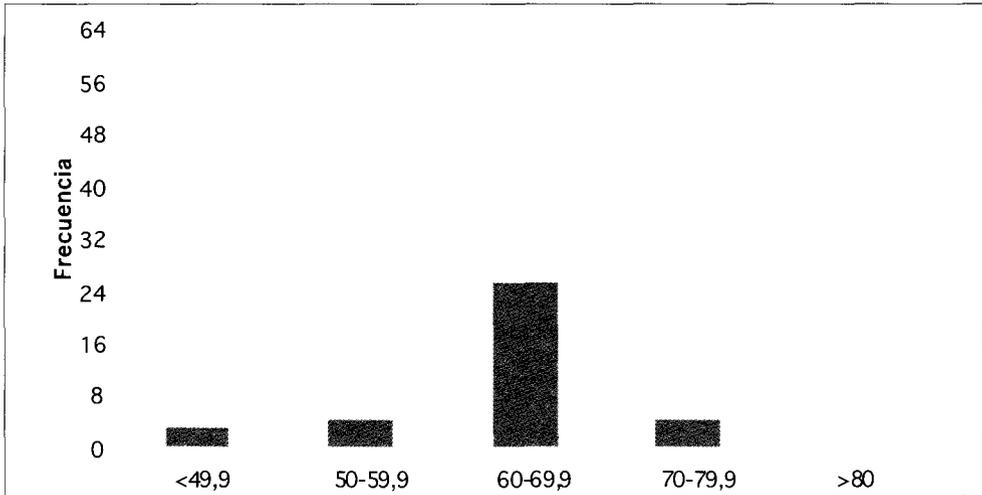


Figura 4. Distribución de frecuencias de la dureza del agua (mg/L CaCO₃).

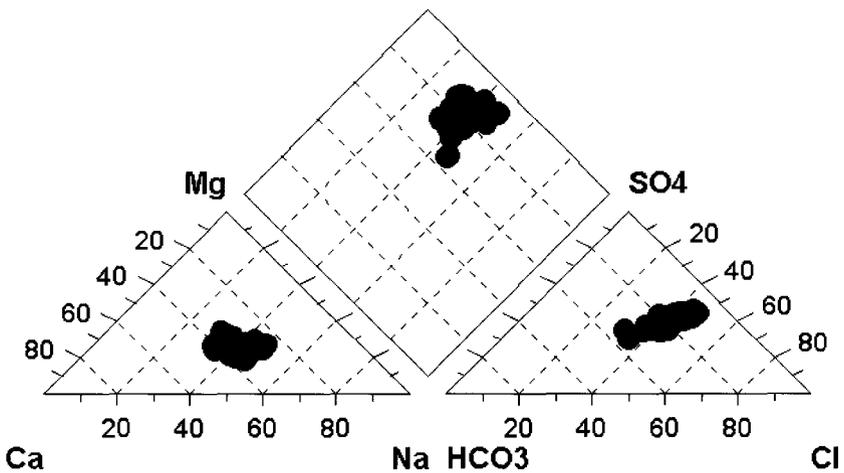


Figura 5. Diagrama de Piper mostrando la composición química del agua del manantial.

Tipo de agua	Frecuencia
Na-Ca-Mg-NO ₃ -Cl	5
Na-Ca-Mg-NO ₃ -SO ₄	2
Na-Ca-Mg- SO ₄ -Cl	1
Na-Ca-Mg -Cl- SO ₄	3
Na-Ca-NO ₃ -Cl- SO ₄	8
Na-Ca-NO ₃ - SO ₄ -Cl	3
Na-Ca-NO ₃ - SO ₄ -HCO ₃	1
Na-Ca-NO ₃ -Cl-HCO ₃	1
Na-Cl-NO ₃ -SO ₄	1
Na-Mg-NO ₃ -SO ₄ -Cl	1
Ca-Na-Mg-NO ₃ -Cl	2
Ca-Na-Mg- Cl -NO ₃ -SO ₄	2
Ca-Mg -Na -NO ₃ -SO ₄	2
Ca-Na-NO ₃ -Cl-SO ₄	2
Na-Ca-Cl-NO ₃ -SO ₄	1
Na-Ca-Cl-SO ₄ -NO ₃	1

Tabla 6. Distintos tipos de composición química del agua del manantial.

granitoides del Norte de Portugal, también obtienen resultados semejantes.

La composición química de las aguas subterráneas, caracterizadas por los componentes inorgánicos Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, NO₃⁻, Cl⁻, SO₄²⁻ y HCO₃⁻ es el resultado de la meteorización química natural y de fuentes antrópicas. La concentración de cada elemento puede presentar 2 aportaciones, una relacionada con la meteorización y otra relacionada con la polución. Para tratar de distinguir la contribución parcial de ambas se ha aplicado el análisis factorial.

En la realización del análisis factorial, se han obviado 4 de las 36 muestras utilizadas en la caracterización química. Las variables utilizadas para los factores analizados fueron Na⁺, K⁺, Ca²⁺, HCO₃⁻, Cl⁻, SO₄²⁻ y NO₃⁻ y para representar estadísticamente la contribución a la composición química se extrajeron 3 factores (tabla 7).

El resultado del análisis factorial basado en los tres factores más significativos, indica que estos factores explican sobre el 72 % de la varianza total. La tabla 7 muestra que Na⁺, HCO₃⁻, Ca²⁺ y K⁺, tienen una elevada carga en el factor 1, y que Mg²⁺ y SO₄²⁻ tienen elevada carga en el factor 2 y 3 respectivamente. El Cl⁻ y NO₃⁻ muestran buena relación con los factores 1 y 3. Los tres factores indican que pueden existir tres contribuciones diferentes en la determinación del agua del manantial.

El Na⁺, HCO₃⁻, Ca²⁺ y K⁺, pueden tener procedencia de los procesos naturales de meteorización. El Mg²⁺ tendría en la biotita su principal aporte, indicando también un origen natural pero distinto al anterior. El factor 3 representaría el factor antrópico, estando el Cl⁻ y NO₃⁻ determinado tanto por procesos naturales como por actividades antropogénicas.

	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Comunalidades
Na ⁺	0.783	0.459	4.68*10 ⁻²	0.826
HCO ₃ ⁻	0.764	5.91*10 ⁻²	- 5.5*10 ⁻²	0.590
Ca ²⁺	0.753	0.343	0.104	0.696
Cl ⁻	0.539	0.109	0.528	0.582
NO ₃ ⁻	0.521	- 0.502	0.479	0.752
K ⁺	0.412	- 0.797	- 7.49*10 ⁻²	0.811
Mg ²⁺	- 0.469	0.564	0.394	0.693
SO ₄ ²⁻	- 0.581	- 0.228	0.672	0.841
% varianza explicada	38.188	20.005	14.191	
% varianza acumulada	38.188	58.193	72.384	

Tabla 7. Resultados de los principales factores analizados (mg/L).

Caracterización del agua para riego

En cuanto a la caracterización del agua para riego se ha considerado la clasificación del U.S. Salinity Laboratory Staff, basada en el índice SAR (relación de absorción de sodio) y en la conductividad eléctrica. El 100% de las muestras de agua pertenecen al grupo C2-S1, esto es, aguas con un peligro medio de salinización del suelo y bajo peligro de alcalinización.

Se puso de manifiesto la influencia de las variaciones de caudal sobre la composición iónica de las aguas, las cuales se caracterizan por el predominio de la facies clorurada-sulfatada sódica-cálcica. Desde el punto de vista de la calidad para uso agrícola se incluyen en el grupo C2-S1, que corresponde a aguas con un peligro medio de salinización del suelo y bajo peligro de alcalinización.

CONCLUSIONES

El agua del manantial tras circular durante una corta distancia por la superficie del suelo se caracteriza por presentar un valor de pH ligeramente superior a la neutralidad, por ser un agua de mineralización media, blanda y de carácter aniónico. Entre los cationes se observó un claro predominio de sodio y calcio frente a magnesio y potasio.

Recibido: 03-VI-03
Aceptado: 14-VII-03

BIBLIOGRAFIA

- AGUEDA, J. A. (1997). Las aguas continentales de superficie y subterráneas como receptores de la contaminación. En: *Contaminación e Ingeniería Ambiental. Vol. III: Contaminación de las aguas*. Bueno, J. L., Sastre, H., Lavin, A.G. (Eds.). FICYT. Oviedo. España, pp.: 31-58.
- CARBALLEIRA, A.; DEVESA, C.; RETUERTO, R.; SANTILLAN, E. & UCIEDA, F. (1983). *Bioclimatología de Galicia*. Fundación Pedro Barrié de la Maza. A Coruña, pp. 391 + mapas.
- de UÑA ÁLVAREZ, E. (1986). *El macizo de "A Coruña": Análisis estructural y morfología de un afloramiento granítico*. Tesis Doctoral. Universidad de Santiago, pp. 1058.
- DIEGUÉZ VILLAR, A. (1998). *Estudio del contenido en iones mayoritarios de las aguas de escorrentía de dos cuencas agrarias*. Tesis de Licenciatura. Universidade da Coruña, pp. 94.
- FREEZE, R. A. & CHERRY, J. A. (1979). *Groundwater*. Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey 07632, pp. 604.
- FRENGSTAD, B.; BANKS, D. & SIEREWERS, U. (2001). The chemistry of Norwegian groundwaters: IV. The pH-dependence of element concentrations in crystalline bedrocks groundwaters. *Sci. Total Environ.*, 277: 101-117.
- HELENA SOTO, B. A. (1997). *Hidroquímica y contaminación de las aguas subterráneas de un acuífero aluvial al norte de Valladolid*. Tesis de Doctorado. Universidad de Valladolid, pp. 303.
- HEM, J. D. (1970). *Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water*. U.S. Geological Survey. Water-Supply Paper 1473, pp. 363.
- IGME (1975). *Mapa 1:50.000 y memoria de la hoja 21 (A Coruña)*. Instituto Geológico y Minero de España. Madrid.
- IGME (1981). *Mapa 1:50.000 y memoria de la hoja 45 (Betanzos)*. Instituto Geológico y Minero de España. Madrid.
- LEITÃO, T.E., LOBO-FERREIRA, J.P.C. (2000). Avaliação da qualidade das águas subterráneas nas áreas do plano de bacia hidrográfica do Rio Minho. En: *Las aguas subterráneas en el noroeste de la Península Ibérica*. Samper, T. Leitão, L. Fernández & L. Ribeiro (eds.). Instituto Geológico y Minero de España, pp. 147- 154.
- LOTZE, F. (1945). Zur Gliederung der Varisziden der Iberischen Meseta. *Geotekt. Forsch.*, 6: 78-92 (Traducido por J. M. Ríos: Observaciones respecto a la división de los variscidas de la Meseta Ibérica. *Pub. Extr. Geol. España*. V: 149-166, Madrid 1950).
- MARTÍNEZ CORTIZAS, A. (1987). Zonas Agroecológicas de Galicia: Zonas climáticas FAO. *Anal. Edaf. Agrob.*, 46: 521-538.
- MARTINS CARVALHO, J.; PLASÊNCIA, N.; CHAMINÉ, H. I.; RODRIGUES, B. C.; DIAS, A. G. & ANTUNES DA SILVA, M. (2000). Recursos hídricos subterráneos em formações cristalinas do Norte de Portugal. En: *Las aguas subterráneas en el noroeste de la Península Ibérica*. J. Samper, T. Leitão, L. Fernández & L. Ribeiro (eds.). Instituto Geológico y Minero de España, pp. 155- 162.
- MATTE, P. (1968). *La structure de la virgation berynnienne de Galice*. Thèse Doctoral. Lab. Geol. de la Fac. de Sciences Grenoble, 44: 123 pp.
- MOPTMA-MINER (1994). *Libro blanco de las aguas subterráneas*, pp. 135.
- MORATILLA, P. & YÉLAMOS, J. G. (2000). Hidrogeoquímica de las aguas minerales de la Península. *Geogaceta*, 28: 101-104.
- RODRÍGUEZ BLANCO, M. L. (2003). *Evaluación del contenido iónico de un manantial de una zona periurbana*. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias. Universidad de A Coruña, pp 152.
- SAMPER CALVETE, J. (2000). Estado actual del conocimiento de las aguas subterráneas en Galicia. En: *Las aguas subterráneas en el noroeste de la Península Ibérica*. Samper, J., Leitão, T., Fernández, L. & Ribeiro, L. (eds.). Instituto Geológico y Minero de España, pp. 113-128.
- SORIANO, G. & SAMPER, J. (2000). Calidad de las aguas subterráneas y su contaminación por aguas residuales y residuos ganaderos: Resultados en la cuenca del Valiñas (A Coruña, España). En: *Las aguas subterráneas en el Noroeste de la Península Ibérica*. Samper, J. Leitão, T., Fernández, L. & Ribeiro, L. (eds.). Instituto Geológico y Minero de España. Madrid, pp. 309-316.
- TABOADA CASTRO, T.; DIÉGUEZ, A.; LÓPEZ, B. & PAZ-GONZÁLEZ, A. (2000). Comparison of Conventional Water Testing Methods with Ion-Selective Electrodes Technique for NO₃⁻, Cl⁻, Ca²⁺, K⁺ and Na⁺. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 31 (11-14): 1993-2005.

- VIDAL ROMANÍ, J. R. (1989). Geomorfología granítica en Galicia, N.W. España. *Cadernos Laboratorio Xeolóxico de Laxe*, 13: 89-163.
- VIDAL ROMANÍ, J. R. & TWIDALE, C. R. (1998). *Formas y paisajes graníticos*. Publicaciones de la Universidad de A Coruña. Monografía N° 55.
- XUNTA DE GALICIA (1991). *Estudio de Recursos de Agua Subterránea en Galicia*. Realizado por EPTISA y el ITGE por encargo de la COTOP.
- XUNTA DE GALICIA (1999). *Atlas climático de Galicia*. Centro de Información e Tecnoloxía, pp. 207.