

APROXIMACIÓN A LAS CARACTERÍSTICAS HIDROQUÍMICAS DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN MONTILLA (CÓRDOBA)

Francisco José Espejo Alcaide

Resumen:

El acuífero Fernán Núñez-Montalbán-Montilla está situado en el sur de la provincia de Córdoba y ocupa una superficie de 102 km². Está formado por areniscas, calcarenitas, arenas y conglomerados del Andaluciense-Plioceno. El objetivo de este trabajo es acercarse al conocimiento de la calidad química del agua subterránea en esta zona. El estudio está basado en los resultados analíticos de un conjunto de muestras de aguas subterráneas (pozos y manantiales) distribuidos por la zona y su relación con las características hidrogeológicas locales conocidas. Fueron seleccionados 5 pozos y 9 manantiales para su control analítico durante 2002-2003. A las muestras se les analizó los iones mayoritarios (Na⁺, K⁺, Mg⁺⁺, Ca⁺⁺, Cl⁻, SO₄²⁻, CO₃H⁻, NO₃⁻), pH, sólidos disueltos totales, hierro, conductividad y dureza. Fueron calculados los índices de saturación, actividades y fuerza iónica de cada punto muestreado. El estado de saturación fue cuantificado utilizando el programa PHREEQC. La influencia de la tipología edáfico-lítica en las facies hidroquímicas fue considerada. Las aguas presentan facies bicarbonatadas cálcicas principalmente. Las zonas evaporíticas locales dan lugar a facies sulfatadas y cloruradas. Las aguas subterráneas mostraron capacidad de disolución de yeso y anhidrita, así como saturación respecto a calcita en ocasiones puntuales. Los valores de conductividad eléctrica están comprendidos entre 513 y 2130 µS/cm (mineralización notable a fuerte). La contaminación de los acuíferos por nitratos limitan su posible uso como agua de abastecimiento. En general la calidad natural del agua es adecuada para el riego de los cultivos tradicionales: olivar y viñedo.

Palabras clave: Acuífero, agua subterránea, hidroquímica, Montilla.

INTRODUCCIÓN

El estudio de la composición química de las aguas subterráneas a una escala local permite, por una parte, aclarar algunos aspectos geoquímicos que afectan a la zona objeto de estudio y, por otra, obtener información hidroquímica desconocida que ayude en futuros estudios de hidrología local o regional. De entre los escasos estudios hidrogeológicos de la zona destacan Coma y Felgueroso, 1967; IGME, 1988; ITGE, 1995. En base a los resultados de los análisis se han estudiado las características y calidad química de las aguas subterráneas y la situación actual respecto a la contaminación por nitratos principalmente. Se considera conveniente en primer lugar, presentar un breve esquema de las características geológicas y climatológicas de la zona estudiada. En este trabajo se estudiaron una serie de puntos de muestreo,

Marco geológico

Montilla (37°35' latitud N y 4°40' longitud W), está situada al sur de la provincia de Córdoba, dentro de la comarca natural de la Campiña alta, a 372 metros de altura y con un término municipal de 167.4 Km² (Figura 1). La zona de estudio está localizada dentro de las formaciones prebélicas y depresiones neógenas, con abundancia de materiales sedimentarios (margas, calizas, conglomerados y areniscas). Geológicamente podemos diferenciar, por un lado las cuencas neógenas y por el otro, zonas pertenecientes a unidades olitrostómicas de la depresión del Guadalquivir. Es decir la zona está ubicada en la conexión de las zonas externas con los materiales postorogénicos del valle de Guadalquivir (IGME, 1988). El relleno de las cuencas neógenas se produjo en condiciones tectónicas de estabilidad, durante el Messiniense

Navisa Industrial Vinícola Española S.A. Ctra. de Montalbán s/n. 14550 Montilla. Teléfono de contacto: 690 351 536. E-mail: calidad@navisa.es

Artículo recibido el 3 de octubre de 2003, recibido en forma revisada el 26 de noviembre de 2004 y aceptado para su publicación el 14 de diciembre de 2005. Pueden ser remitidas discusiones sobre el artículo hasta seis meses después de la publicación del mismo siguiendo lo indicado en las "Instrucciones para autores". En el caso de ser aceptadas, éstas serán publicadas conjuntamente con la respuesta de los autores.

con rocas de tipo carbonatadas y evaporíticas (Felgueroso y Coma, 1964). Los materiales evaporíticos son principalmente yesos triásicos en las inmediaciones del sector subbético externo (Duran et al., 1999) y presentan manifestaciones kársticas zonales (IGME, 1988; Alonso, 1999).

Los principales tipos de suelos son los llamados bujeos (margoso bético, sobre margas del Mioceno, de estructura compacta con arcillas de carácter expansivo y profundos) y las albarizas (sobre margas y calizas del Terciario de tipo rendsiniformes de colores grises; ricos en carbonato cálcico, de textura limosa o limo-arcillosa; con buena estructura y permeabilidad) (Sánchez et al., 1983). Todo ello produce una variedad lítica y edafológica importante.

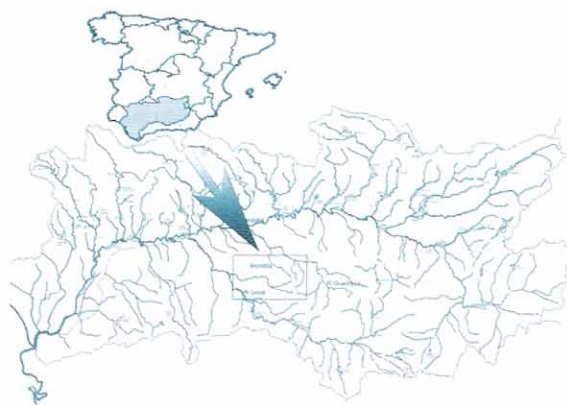


Figura 1. Localización general en la cuenca hidrográfica del Guadalquivir. (Fuente: modificado del mapa de cuenca de la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir).

Climatología

El área estudiada pertenece a una zona climática Mediterráneo subtropical (De León et al., 1989; Fernández et al., 1999). En la tabla 1 se muestran las temperaturas y precipitaciones medias mensuales obtenidas en el periodo comprendido entre 1987 y 2000 en Montilla. En la serie climática analizada se observa un máximo anual de precipitaciones entre octubre a enero y un período de mínimas lluvias los meses de julio y agosto. La zona está situada dentro de la isoyeta de los 400-600 mm anuales (con lluvia útil de 200 mm), aunque existe una franja en dirección NO-SE con pluviometría entre 600-800 mm anuales. Tiene un período seco de 3.5 meses y de 2800 a 3000 horas anuales de sol efectivas (García del Barrio et al., 1980). La escasa pluviometría anual y las lluvias estivales escasas o ausentes son dos rasgos característicos del clima andaluz en general (ITGE, 1998).

Tabla 1. Temperaturas y precipitaciones medias en Montilla (1987-2000).

Mes	Temperatura (°C)			Precipitación media (mm)
	Mx	Mn	Med	
Enero	13.1	4.0	8.6	75.8
Febrero	15.5	5.0	10.3	46.1
Marzo	19.8	7.3	13.6	30.2
Abril	19.2	7.8	14.8	56.1
Mayo	25.0	11.9	18.5	37.9
Junio	30.0	15.4	22.7	13.1
Julio	34.4	18.3	26.3	2.2
Agosto	34.5	18.8	26.6	9.0
Septiembre	29.4	15.8	22.6	37.2
Octubre	22.5	12.2	17.4	77.3
Noviembre	17.1	8.0	12.6	81.7
Diciembre	13.9	5.6	9.8	106.0
Media anual	22.9	10.8	17.0	572.6

(Fuente: Elaboración propia a partir de datos suministrados por el Instituto Nacional de Meteorología)

Hidrología superficial

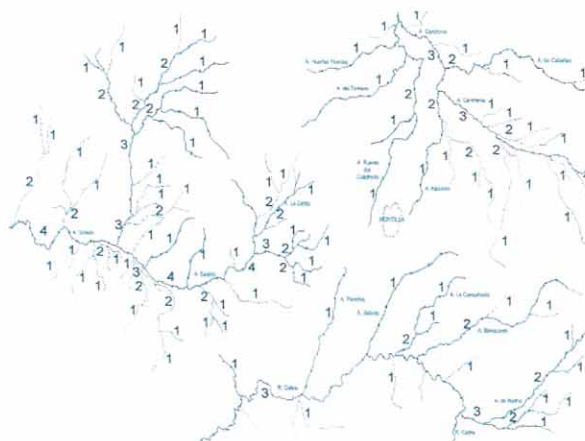


Figura 2. Red de drenaje local a partir de la hoja 966 del Mapa Topográfico Nacional de Montilla, escalas 1:50.000 y 1:10.000 (Jerarquización de los cauces de 1º orden a 4º orden).

Montilla está en la línea divisoria de aguas superficiales que por el norte tributa al Guadalajoz y por el sur al Genil ambos afluentes de la margen izquierda del Guadalquivir (Figura 1). La red de drenaje de tipo dendrítico alimenta la cuenca hidrográfica del Guadalquivir. La orografía está dominada por suaves lomas que no tienen una dirección predominante lo cual caracteriza la red hidrográfica local (Lopez, 1973). Las aguas superficiales son escasas, destacan arroyos intermitentes con cauces imprecisos y estacionales. Esta incipiente red acusa la falta de precipitaciones que

junto a las elevadas temperaturas provocan altas evapotranspiraciones potenciales, con 855 mm anuales de media (García de Barrio et al., 1980). Todos los arroyos circulan por zonas de pendientes menores al 2 %. Presentan cauces ramificados y jerarquizados, con cauces de 4º orden como máximo y perfiles poco sinuosos (Figura 2).

MATERIAL Y MÉTODOS

Hidrogeología

La zona estudiada pertenece a un acuífero libre de tipo detrítico. El sector 21 o detrítico de Fernán-Núñez-Montalbán-Montilla es un acuífero permeable de porosidad intergranular (ITGE, 1995). Tiene una superficie aproximada de 102 km² (Figura 3 zona a). Está constituido por areniscas, arenas, calcarenitas y conglomerados del Andaluciense-Plioceno, con espesores de hasta 70 m y permeabilidad media o localmente alta (ITGE, 1995). La alimentación o recarga de este acuífero se produce principalmente por infiltración directa del agua de lluvia de la escorrentía superficial. El comportamiento hidrológico de los principales materiales litológicos es de una alta permeabilidad.

Son importantes las zonas del Mioceno superior Messiniense; constituidas por calizas, arenas, limos y margas. Estas formaciones pueden funcionar en zonas específicas como acuíferos confinados.

La zona conocida por El Cuadrado – Cerro del Acirate constituye una subunidad al NO del núcleo urbano (Figura 3 zona b). Está formado por calcarenitas, areniscas calcáreas y conglomerados del Mioceno superior. Este acuífero mixto y fracturado muestra características diferenciales respecto al resto de la zona.

Una de las características principales de estos acuíferos (Figura 3 zonas a y b) es una permeabilidad y porosidad elevada, con amplias zonas de alimentación y recarga. A la vez, la posición elevada de la capa de areniscas y su poca potencia hace que los niveles subterráneos estén drenados en exceso. Tenemos por tanto una cuenca subterránea amplia pero de poco aprovechamiento real, que pierde en la época de estiaje un porcentaje bastante elevado de su capacidad hidráulica. Existen numerosos puntos de salida naturales a través de manantiales situados en cotas bajas.

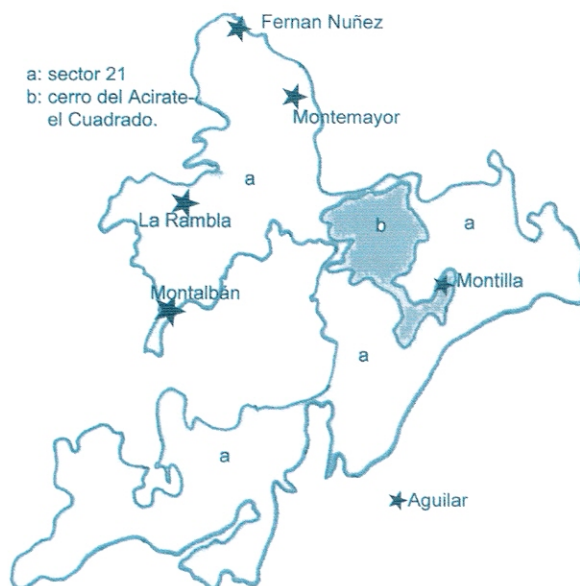


Figura 3. Localización y límites de los acuíferos. (Fuente: modificado del mapa hidrogeológico de España. Hoja 76 / 4-10 Córdoba. ITGE).

En zonas localizadas con terrenos detríticos de baja permeabilidad (zonas Triásicas) el agua subterránea permanece bastante tiempo en contacto con los materiales edáficos y líticos del acuífero. Se disuelven componentes solubles, que dan lugar a aguas con facies hidroquímicas variables según la litología predominante. La cantidad de sólidos disueltos totales del agua dependerá de varios factores entre ellos, las precipitaciones recogidas en la zona y el nivel de laboreo o intensidad agrícola de la zona, en este caso bastante alta.

Instrumental y métodos analíticos

Conductímetro con célula de 1 cm¹ de tipo flujo y compensación de temperatura automática. CT 2 %°C. Calibrado con patrones certificados de 1413 ± 12 μS/cm y de 12.88 ± 0.11 mμ/cm a 25°C. Análisis de conductimetría conforme a la norma UNE 27888 (AENOR, 1993).

pH-metro con compensación de temperatura automática. Calibrado con patrones certificados de pH 7 ± 0.02 y pH 4 ± 0.02 a 25°C.

Respecto a los métodos analíticos utilizados: Cloruros: valoración mercurimétrica. Sulfatos: turbidimetría con sulfato de bario. Bicarbonatos: volumetría con HCl. Hierro y Nitratos: espectrofotometría. Análisis complexométrico para valoración de dureza total (suma de alcalinotérreos) y el resto de elementos mayoritarios (Rodier, 1989).

La fuerza iónica se calculó según (Skoog et al., 2003). Los índices de saturación (SI) respecto de algunos minerales se calcularon con el programa PHREEQC Interactive 2.11 (Parkhurst, 1995).

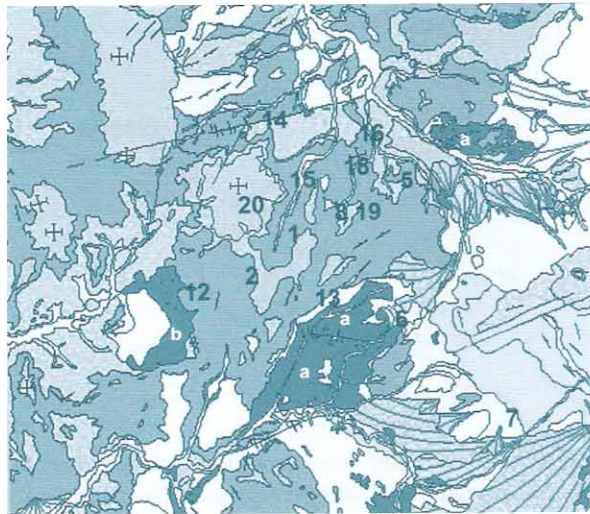


Figura 4. Mapa geológico hoja 966 de Montilla. (Zonas marcadas a y b: zonas Triásicas-yesíferas) (Fuente: modificado de la serie "magna digital" IGME).

Muestreo

Para el manejo y la toma de muestras se siguieron las recomendaciones recogidas en (Barrantes et al., 1992; Wood, 1981). Los puntos de muestreo se repartieron por la zona de estudio (Figura 4) según tipo de suelo y litología (Tabla 2).

Las muestras analizadas pertenecen a 5 pozos de producción de carácter doméstico y 9 manantiales. Los análisis fueron realizados durante los años 2002 y 2003. En el caso de los pozos se extrajo agua durante tres horas con bomba sumergible, a caudal constante, previamente a la toma de muestras. La variabilidad de la calidad química en función de la profundidad en los pozos no fue considerada. Cada punto de muestreo fue analizado 3 veces cada año sumando un total de 84 análisis. Los muestreos se repitieron en distintas fechas a lo largo del año, no encontrándose variaciones importantes entre los datos obtenidos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

No se encontraron diferencias analíticas importantes, ni tendencias estacionales durante los dos años estudiados. La variación temporal de la calidad química en los puntos muestreados no es significativa, atendiendo al período interanual estudiado.

Si observamos el diagrama de Piper (Figura 5), encontramos que los aniones están localizados en los tipos intermedios y los cationes son de tipo cálcico. Predominan las facies bicarbonatadas cálcicas, seguidas de las sulfatadas cálcicas y también de cloruradas cálcicas, aparece una muestra clorura sódica. En el mapa hidrogeológico de Córdoba (ITGE, 1995) la zona estudiada está clasificada como de facies bicarbonatada cálcica.

Tabla 2. Caracterización hidrogeológica de los puntos muestreados.

Punto muestreado	Piso geológico	Litología	Comportamiento hidrogeológico	Facies Hidroquímica
20	Mioceno sup. Messiniense	Conglomerados y arenas con pasadas de limos y margas.	Alta permeabilidad	Bicarbonatada cálcica
8-12-14-19	Mioceno sup. Messiniense	Arenas, limos y margas amarillas con intercalaciones de calcarenitas	Media permeabilidad	Bicarbonatada cálcica
1	Mioceno sup. Messiniense	Arenas, limos y margas amarillas con intercalaciones de calcarenitas	Media permeabilidad	Sulfatada magnésica
2-16-18	Mioceno sup. Messiniense	Arenas, limos y margas amarillas con intercalaciones de calcarenitas	Media permeabilidad	Sulfatada cálcica
15	Mioceno sup. Messiniense	Arenas, limos y margas amarillas con intercalaciones de calcarenitas	Media permeabilidad	Clorurada sódica
5	Mioceno sup.	Margas gris azuladas a techo algo arenosas	Baja permeabilidad	Bicarbonatada cálcica
13-6	Triásico sup.	Arcillas abigarradas, areniscas y yesos.	Baja permeabilidad	Clorurada cálcica y Bicarbonatada cálcica
7	Cretácico	Margas y margocalizas	Baja permeabilidad	Clorurada cálcica

Nº de muestra en (■): grupo BC1 (Aguas bicarbonatadas); en (■): grupo BC2 (Aguas bicarbonatadas); en (■): grupo SC (Aguas sulfatadas).

APROXIMACIÓN A LAS CARACTERÍSTICAS HIDROQUÍMICAS DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN MONTILLA (CÓRDOBA)

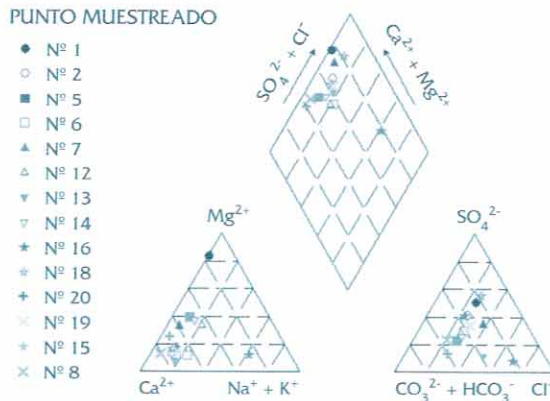


Figura 5. Diagrama de Piper. Clasificación hidroquímica.

La tabla 2 relaciona las aguas con facies bicarbonatadas cálcicas con zonas del Mioceno superior (Messiniense) de media y alta permeabilidad hidrogeológica. En áreas de baja permeabilidad aparecen facies cloruradas cálcicas. Aunque la relación facies hidroquímica y litología no es tan evidente y directa, ya que intervienen otros factores importantes. El tiempo de permanencia del agua en el acuífero, los procesos físico-químicos predominantes y los modelos de circulación condicionan las características del agua subterránea. Las reacciones con los materiales constitutivos de los acuíferos (interacción agua-roca), la mezcla o dilución de aguas, el tiempo de residencia del agua en el acuífero así como la relación entre di-

solución y precipitación de elementos son factores primordiales para entender el sistema de equilibrio químico de las aguas subterráneas.

En los datos analíticos que presentan la tabla 3 encontramos una salinidad media superior a 0.5 g/L y máxima de 1.52 g/L; contenidos medios en sulfatos de 160 mg/L y el sodio presenta valores entre 7 y 266 mg/L. Son aguas de mineralización notable (93 %) y duras (71 %). La climatología predominantemente seca, la litología local, el nivel de recarga de los acuíferos y el tiempo de contacto agua-roca son factores que producen altos contenidos en sales totales en las aguas subterráneas.

Las aguas subterráneas fueron agrupadas en tres conjuntos atendiendo a las características diferenciales siguientes. El grupo BC1 engloba las muestras 5,6,8,12 y 19; son aguas de facies bicarbonatadas cálcicas, todas menos la 19 pertenecen a manantiales que drenan aguas de circulación local de mineralización media. Posiblemente hayan estado poco tiempo en contacto con el acuífero o bien su configuración química es consecuencia de la mezcla con aguas más antiguas y mineralizadas. Existe una buena relación de los sulfatos con calcio, sodio, bicarbonatos y cloruros, con coeficientes de correlación de: 0.58, 0.78, 0.76 y 0.97 respectivamente. Esto puede indicar fuentes de origen similar para los sulfatos y estos iones (v.g. disolución mineral).

Tabla 3. Composición química del agua subterránea.

Punto muestreado		1	2	5	6	7	12	13	14	16	18	20	19	15	8
Tipo y profundidad (m)		P: 30	P: 35	M	M	P: 15	M	M	M	M	M	P: 49	P: 10	M	M
Parámetro	Unidad														
pH a 20°C	-	6.70	7.11	7.37	7.33	7.18	7.31	6.92	7.24	7.32	7.04	6.64	6.99	7.39	7.55
C.E. a 20°C	µS/cm	2130	979	780	990	1617	1015	1370	773	839	1467	513	1288	1879	664
C.E. a 25°C	µS/cm	2370	1083	868	1102	1793	1127	1521	861	934	1628	571	1438	2090	737
Cloruros (Cl)	mg/L	175	95	70	110	200	110	210	70	65	128	40	120	445	40
Bicarbonatos (HCO ₃ ⁻)	mg/L	280	213	213	274	246	304	277	179	176	158	155	237	243	179
Sulfatos (SO ₄ ²⁻)	mg/L	450	200	75	150	240	150	62	80	150	360	25	175	70	60
Nitratos (NO ₃ ⁻)	mg/L	250	100	100	85	85	80	88	125	90	115	125	90	55	140
Potasio (K ⁺)	mg/L	4.5	1	6	<1	1	2.5	25	20	2	15	<1	10	5.5	1
Calcio (Ca ⁺⁺)	mg/L	72	180	130	160	192	112	196	84	128	228	88	176	100	124
Magnesio (Mg ⁺⁺)	mg/L	233.4	19.4	60	17	63.2	51	12.2	38.9	19.4	31.6	19.4	21.9	26.7	12.2
Sodio (Na ⁺)	mg/L	7	35	30	66	30	61	40	20	30	34	9	40	266	10
T.D.S.	g/L	1.52	0.69	0.56	0.71	1.15	0.72	0.97	0.55	0.60	1.04	0.37	0.92	1.34	0.47
Grado dureza	°F	114	53	36	47	74	49	54	37	40	70	30	53	36	36
Dureza	mg/L CO ₃ Ca	1136	528	359	468	738	488	538	369	399	698	299	528	359	359
Clasif. riego Riverside	-	C ₂ S ₁	C ₂ S ₁	C ₂ S ₁	C ₂ S ₁	C ₂ S ₁	C ₂ S ₁	C ₂ S ₁	C ₂ S ₁	C ₂ S ₁	C ₂ S ₁	C ₂ S ₁	C ₂ S ₁	C ₂ S ₁	C ₂ S ₁
Clasif. Hidroquímica	-	A	B	C	C	D	C	D	C	B	B	C	C	E	C

P: pozo; M: manantial. C.E.: Conductividad eléctrica., T.D.S.: Sólidos totales disueltos. A: Sulfatada magnésica; B: Sulfatada cálcica; C: Bicarbonatada cálcica; D: Clorurada cálcica; E: Clorurada sódica. N° de muestra en (■): grupo BC1(Aguas bicarbonatadas); en (■): grupo BC2 (Aguas bicarbonatadas); en (■): grupo SC (Aguas sulfatadas).

El grupo BC2 está representado únicamente por el pozo 20 y el manantial 14, este último descarga aguas de la subunidad El Cuadrado-Cerro del Acirate. También son aguas bicarbonatadas cálcicas pero con baja mineralización. En las rocas permeables por fracturación existe un contacto roca-agua menos directo y por lo tanto la cesión de sales es lenta. La muestra 20 presenta a este pH una actividad alta del CO_3H_2 , igual o superior a la del CO_3H^- . Estas muestras son representativas de la calidad química diferenciada que encontramos en esta subzona.

Y por último un grupo de influencia evaporítica SC que incluye las muestras 1,2,7,13,15,16 y 18. Se manifiesta en aguas sulfatadas (donde la relación iónica $r \text{SO}_4 / r \text{Cl}$ es superior a 1.5) y cloruradas principalmente. Tienen un contenido elevado de sulfatos también acompañado de niveles altos de Ca^{++} y Mg^{++} procedentes de los aportes de las zonas evaporíticas (Figura 4). La influencia de varias zonas kársticas de tipo evaporítico explica los contenidos en sulfatos y calcio que presentan algunas muestras. La principal área está localizada al SE del núcleo urbano, atravesada por los arroyos Guta-Salado y Campiñuela y delimitada por el río Cabra al sur (Figura 4 zona a). Otra zona kárstica de menor importancia geográfica está situada en el pago de Jarata rodeando el cerro de Malabrigo (Figura 4 zona b). Ambos son terrenos margoarcillosos con yesos y halita del Triásico Germánico. El substrato detrítico-evaporítico triásico condiciona el quimismo del agua presentando facies sulfatadas cálcicas (2,16,18) y surgencias de facies cloruradas sódicas (15). Encontramos

explotaciones industriales activas y abandonadas de cloruro sódico (salmueras) situadas en estas zonas triásicas (Rubio, 1997). Son materiales permeables y transmisivos pero con poca capacidad de retención, que dan lugar a facies hidroquímicas sulfatadas cálcicas y cloruradas sódicas de escaso interés en cuanto a su aprovechamiento (Durán et al., 1999; Pulido, 1999).

Los niveles de cloruros están en torno a 70 mg/L, con valores normales inferiores a 100 mg/L. Pero en un porcentaje elevado de muestras se constata la influencia de las rocas evaporíticas y los cloruros suben hasta 445 mg/L. Los cloruros aparecen asociados al sodio, con un alto índice de correlación ($r = 0.86$). La relación cloruros y conductividad también es elevada ($r = 0.83$). En aguas ricas en cloruros como la 15 (clorurada sódica) es posible sospechar que se produzca un fenómeno de intercambio iónico, aumentando la concentración de Na^{++} y reduciendo el Ca^+ . El piso geológico corresponde a materiales sedimentarios del Mioceno que no son coherentes con la tipología hidroquímica; lo cual podría explicarse por la influencia química de áreas evaporíticas de halita o rocas sulfatadas muy cercanas o por el tránsito anterior por materiales salinos.

Los tipos cálcicos son predominantes, los contenidos en Ca^{++} son inferiores a 250 mg/L, aumentan en aguas que contienen un mayor nivel de sulfatos (terrenos yesíferos). Los suelos ricos en carbonato cálcico incrementan los contenidos de Ca^{++} , por disolución en las aguas de recarga que alimentan la zona saturada.

Tabla 4. Valores de fuerza iónica, actividades e índices de saturación de los puntos muestreados.

Punto muestreado		1	2	5	6	7	12	13	14	16	18	20	19	15	8
Parámetro	Unidad	P	P	M	M	P	M	M	M	M	M	P	P	M	M
Fuerza iónica	-	0.039	0.019	0.013	0.018	0.026	0.019	0.019	0.013	0.015	0.026	0.010	0.020	0.023	0.012
SI calcita ^b	-	-0.91	-0.03	-1.25	0.28	0.11	0.15	-0.08	-0.24	0.00	-0.19	-0.96	-0.13	0.09	0.27
SI dolomita ^b	-	-1.02	-0.75	-0.89	-0.13	0.01	0.24	-1.08	-0.53	-0.53	-0.95	-2.30	-0.88	-0.12	-0.18
SI yeso ^b	-	-1.33	-1.08	-2.55	-1.23	-1.04	-1.40	-1.54	-1.73	-1.29	-0.80	-2.30	-1.14	-1.77	-1.67
SI anhidrita ^b	-	-1.57	-1.32	-2.79	-1.47	-1.28	-1.63	-1.77	-1.96	-1.53	-1.04	-2.38	-1.38	-2.01	-1.90
$a(\text{Cl}^-)$	mol/L	4.07×10^{-2}	2.32×10^{-2}	1.75×10^{-2}	2.70×10^{-2}	4.80×10^{-2}	2.69×10^{-2}	5.14×10^{-2}	1.75×10^{-2}	1.61×10^{-1}	3.07×10^{-2}	1.02×10^{-2}	2.93×10^{-2}	10.8×10^{-2}	1.01×10^{-2}
$a(\text{HCO}_3^-)$	mol/L	3.82×10^{-2}	3.04×10^{-2}	3.11×10^{-2}	3.93×10^{-2}	3.45×10^{-2}	4.35×10^{-2}	3.96×10^{-2}	2.61×10^{-2}	2.55×10^{-2}	2.21×10^{-2}	2.30×10^{-2}	3.38×10^{-2}	3.43×10^{-2}	2.63×10^{-2}
$a(\text{SO}_4^{2-})$	mol/L	2.25×10^{-2}	1.20×10^{-2}	0.49×10^{-2}	0.91×10^{-2}	1.34×10^{-2}	0.91×10^{-2}	0.37×10^{-2}	0.52×10^{-2}	0.96×10^{-2}	2.01×10^{-2}	0.17×10^{-2}	1.05×10^{-2}	0.40×10^{-2}	0.40×10^{-2}
$a(\text{NO}_3^-)$	mol/L	3.25×10^{-2}	1.38×10^{-2}	1.42×10^{-2}	1.18×10^{-2}	1.15×10^{-2}	1.11×10^{-2}	1.22×10^{-2}	1.77×10^{-2}	1.27×10^{-2}	1.55×10^{-2}	1.81×10^{-2}	1.24×10^{-2}	0.75×10^{-2}	2.00×10^{-2}
$a(\text{K}^+)$	mol/L	0.10×10^{-2}	0.02×10^{-2}	0.14×10^{-2}	0.02×10^{-2}	0.02×10^{-2}	0.06×10^{-2}	0.06×10^{-2}	0.05×10^{-2}	0.05×10^{-2}	0.35×10^{-2}	-	0.23×10^{-2}	0.13×10^{-2}	0.02×10^{-2}
$a(\text{Ca}^{++})$	mol/L	0.92×10^{-2}	2.70×10^{-2}	2.10×10^{-2}	2.42×10^{-2}	2.71×10^{-2}	1.69×10^{-2}	2.94×10^{-2}	1.35×10^{-2}	2.02×10^{-2}	3.20×10^{-2}	1.50×10^{-2}	2.63×10^{-2}	1.44×10^{-2}	2.04×10^{-2}
$a(\text{Mg}^{++})$	mol/L	5.22×10^{-2}	0.49×10^{-2}	0.23×10^{-2}	0.44×10^{-2}	1.53×10^{-2}	1.31×10^{-2}	0.31×10^{-2}	1.06×10^{-2}	0.52×10^{-2}	0.76×10^{-2}	0.55×10^{-2}	0.56×10^{-2}	0.66×10^{-2}	0.34×10^{-2}
$a(\text{Na}^+)$	mol/L	0.25×10^{-1}	1.33×10^{-2}	1.16×10^{-2}	2.51×10^{-2}	1.12×10^{-2}	2.32×10^{-2}	1.52×10^{-2}	0.77×10^{-2}	1.15×10^{-2}	1.26×10^{-2}	0.35×10^{-2}	1.52×10^{-2}	9.98×10^{-2}	0.39×10^{-2}

a: Actividad del elemento en la disolución. SI: Índice de saturación. ^bLos valores en negro están en equilibrio con respecto al mineral. Los valores en (■) están subsaturadas y en (■) sobresaturadas. (Intervalo de equilibrio para la calcita entre -0.15 y 0.15; para la dolomita entre -0.30 y 0.30; para el yeso entre -0.03 y 0.03). P: pozo; M: manantial

APROXIMACIÓN A LAS CARACTERÍSTICAS HIDROQUÍMICAS DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN MONTILLA (CÓRDOBA)

El Mg^{++} analizado muestra valores inferiores a 60 mg/L, excepto en la muestra 1 (sulfatada magnésica) que alcanza 233 mg/L, acompañado de un valor elevado de sulfatos. El índice hidroquímico $r Mg / r Ca$ de la muestra 1 tiene un valor de 5.33 similar al presentado por el agua de mar, indicio del paso del agua subterránea por terrenos sedimentarios de formación marina.

El K^+ sólo sobrepasa los 10 mg/L en las muestras: 13, 14 y 18. La disolución de posibles depósitos de rocas evaporíticas de tipo silvina (KCl) (13) o la contaminación por aguas residuales urbanas (18) pueden explicar estos valores, que por otro lado, no son contenidos extremadamente altos.

Todas las muestras fueron analizadas de hierro total encontrándose contenidos inferiores a 0.1 mg/L. Sin embargo la muestra 13 presenta un contenido apreciable de Fe con 3.4 mg/L, que al oxidarse precipita en forma de hidróxido férrico. Contiene 0.5 mg/L en forma férrica (Fe^{3+}) y 2.9 mg/L en forma ferrosa (Fe^{2+}). Este agua procede de un manantial y podría revelar unas condiciones anóxicas, aunque no se puede descartar una posible corrosión metálica de las tuberías de conducción.

Todas las muestras presentan una fuerza iónica elevada superior a 0.01 (Tabla 4). El programa PHREEQC fue utilizado para el cálculo de los índices de saturación (SI). Los valores de pH y temperatura (20 °C) han sido tenidos en cuenta. Conociendo el índice de saturación podemos predecir la tendencia del agua a precipitar o disolver algunos iones (Tabla 4). Para la calcita, el rango de equilibrio considerado está entre -0.15 y 0.15 y para la dolomita entre -0.30 y 0.30 (Sacks, 1996).

El 21 % de las muestras estudiadas presentan una sobresaturación de calcita y por lo tanto una tendencia a precipitar CO_3Ca en las condiciones de pH del agua. En aguas que han permanecido largo tiempo en el acuífero, la disolución del yeso aumenta el contenido en calcio del agua, favoreciendo así la posible precipitación de calcita. Sin embargo comprobamos cómo las aguas de contenido elevado en sulfatos tienden al equilibrio respecto a la calcita (Figura 6). Por otro lado las aguas de los manantiales 6, 8 y 12 (BC1) están sobresaturadas para la calcita aunque no a consecuencia de contenidos elevados en sulfatos sino provocado por otras causas como la variación del contenido en carbónico de las aguas en su circulación local.

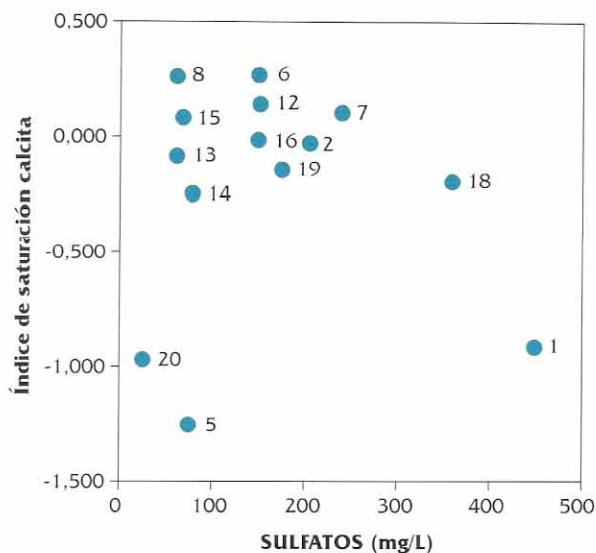


Figura 6. Relación entre el índice de saturación de la calcita y el contenido en sulfatos.

La mayoría de las muestras están subsaturadas con respecto a la dolomita. Las aguas con altos contenidos en sulfatos tienden al equilibrio con respecto a la dolomita (Figura 7).

Todas las muestras estudiadas están en condiciones de disolver yeso ($SO_4Ca \cdot 2H_2O$) y anhidrita (SO_4Ca). Las muestras 2 y 18 (sulfatadas cálcicas) están cerca del equilibrio respecto a la disolución de yeso.

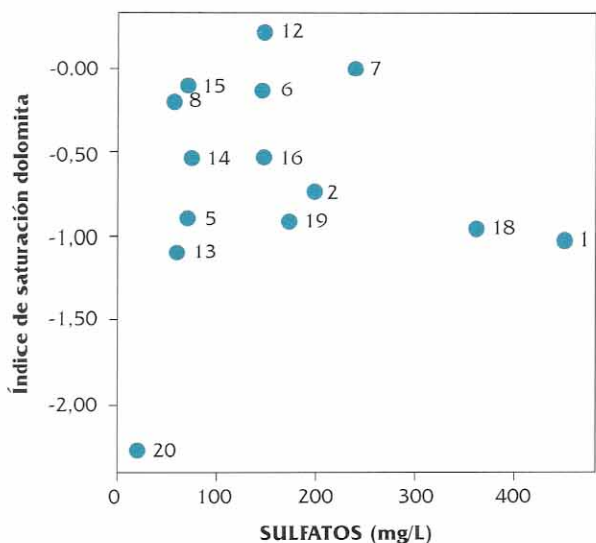


Figura 7. Relación entre el índice de saturación de la dolomita y el contenido en sulfatos.

En la figura 8 comprobamos la relación existente entre los índices de saturación del yeso y el

contenido en sulfatos de las muestras. El índice de saturación del yeso aumenta cuando también aumentan los contenidos en sulfatos del agua. Por ello se deduce que la procedencia principal de sulfatos en la mayoría de las muestras es la disolución de yeso y anhidrita.

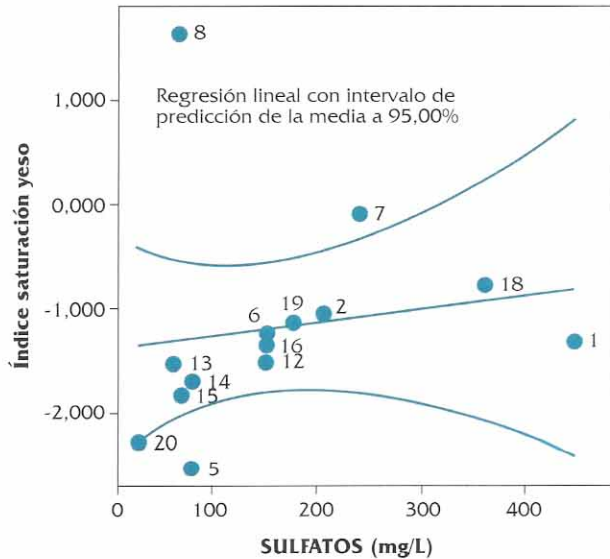


Figura 8. Relación entre el índice de saturación del yeso y el contenido en sulfatos.

La concentración de bicarbonatos y pH son controlados por el equilibrio con la calcita. Los bicarbonatos comprenden valores entre 155 y 304 mg/L y los valores de pH observados oscilan entre 6.64 y 7.55.

En la figura 9 se representa la relación entre la concentración molar de $\text{Ca}^{++} / \text{SO}_4^{=}$ y $\text{Ca}^{++} / \text{HCO}_3^{-}$ para demostrar cómo las concentraciones

de calcio son controladas por la calcita y el yeso. La relación existente entre los contenidos de cloruros y sodio ($r > 0.85$) muestran el origen común de aporte mineral por disolución de halita o bien mezcla con aguas profundas cloruradas sódicas "salmueras" cuya existencia está constatada en el área de estudio.

Podemos comprobar en la tabla 3 un contenido general elevado de nitratos. Según la Directiva 98/83/CEE y el Real Decreto 140/2003 el nivel máximo permitido de nitratos es de 50 mg/L para aguas de consumo humano. Sin duda, el aprovechamiento agrícola generalizado del territorio comarcal, hace que el nivel de materia nitrogenada sea alto y permanente (intervalo 51-150 mg/L NO_3^{-}). El lavado por las precipitaciones es el responsable de la lixiviación por percolación a zonas profundas de los nitratos. La utilización de estiércol, de distinto origen, así como abonos inorgánicos (urea, nitrato amónico o sulfato amónico) para abonado de viñedo y olivar favorecen esta situación.

La contaminación de aguas subterráneas por nitratos, cloruros y sulfatos es cada vez más preocupante en la cuenca hidrográfica del Guadalquivir (ITGE, 1998) y es la causa más frecuente de limitación de la potabilidad de las aguas subterráneas para consumo humano.

La tabla 5 presenta un seguimiento del punto de muestreo número 2 durante un período de 8 años. No se observa dilución en los parámetros analizados provocada por las precipitaciones anuales. Así pues este punto de muestreo tiene una elevada inercia en su configuración química. Los

Tabla 5. Evolución de parámetros físico-químicos en el punto núm. 2 del inventario, cercano a Montilla (Período: 1997-2004).

Parámetro	Unidad	Año									
		1997-1	1997-2	1998-1	1998-2	1999	2000	2001	2002	2003	2004
pH a 20°C	-	7.25	7.14	7.46	7.3	7.42	7.41	7.85	7.94	7.55	7.68
Conductividad a 20°C	$\mu\text{S/cm}$	860	1016	1105	078	000	016	1010	1017	1150	1010
Nitratos (en NO_3^{-})	mg/L	101	96	89	86	80.6	72.3	8.7	73.6	73	46.1
Nitritos (en NO_2^{-})	mg/L	0.04	0.04	0.07	0.05	0.04	0.08	ND	ND	ND	0.03
Amonio (en NH_4^{+})	mg/L	0.06	0.04	0.06	0.03	ND	0.5	0.08	ND	ND	0.01
Oxidabilidad (KMnO_4)	mg/L O_2	1.6	1.6	2.4	1.6	1.6	0.8	0.4	0.12	1.6	1.3
Dureza total	mg/L CaCO_3	110.7	137.5	141	123	562.3	475.3	480.6	493.4	421	608
Grado dureza	°F	11	14	14	12	56	47	48	49	42	61
T.D.S.	g/L	0.56	0.65	0.71	0.59	0.58	0.60	0.65	0.65	0.74	0.88
Precipitaciones / año	mm / año	-	1031	-	365	478	637	676	685	687	484
Precipitaciones en	mm / año	-	770	-	212.6	208.5	462.5	480	517.6	469.5	292.5
Periodo de recarga	% del total	-	75%	-	58%	44%	73%	71%	76%	68%	60%

ND: no detectado

valores de oxidabilidad no superan en ningún caso los 5 mg O₂/L, muestran el contenido en materia orgánica del agua. El nitrato aparece acompañado por contenidos elevados de amonio y nitritos. Los nitritos pueden proceder de la reducción natural de nitratos o bien indicar una contaminación de carácter fecal reciente (Marín, 1996). Lo que hace sospechar la posible importancia de la contaminación difusa por pozos ciegos y fosas sépticas de las zonas residenciales periurbanas (Wakida, 2005). Estas áreas de segunda residencia han tomado gran significación geográfica local en los últimos años, no sólo por su número sino también por su concentración espacial.

Durante el periodo de recarga son recogidas un porcentaje elevado de las precipitaciones en la zona (Tabla 5), lo cual es fundamental para el sostenimiento del nivel hídrico de los acuíferos. Así mismo se puede apreciar el efecto amortiguador de las precipitaciones sobre el contenido de nitratos del sondeo presentado en la tabla 5.

Si nos centramos en la valoración del agua subterránea para riego, éstas son clasificadas como del tipo C₃ S₁, en su mayoría aptas para el riego (Tabla 3) según las normas Riverside (Barrantes et al., 1992; Custodio y Llamas, 2001). Aguas de salinidad alta y contenidos bajos en sodio. En la cuenca hidrográfica del Guadalquivir podemos encontrar aguas semejantes, atendiendo a esta clasificación, en las unidades hidrogeológicas de Sierra Elvira, Depresión de Granada, Aluvial del Guadalquivir, Sevilla-Carmona y Lebrija.

Según los requerimientos químicos recomendados para un agua de riego por Ayers y Wescott (1994) el agua de la zona es considerada aceptable para riego, teniendo en cuenta los parámetros estudiados. Únicamente aparecen limitaciones por valores altos de potasio y magnesio en muestras puntuales.

CONCLUSIONES

La composición química del agua subterránea está condicionada por la diversidad litológica y edáfica local existente. Los resultados obtenidos durante el presente estudio muestran la variabilidad de las características hidroquímicas de elementos mayoritarios dependiendo de la procedencia geológica. La presencia de materiales evaporíticos en distintas zonas contribuye de manera significativa al aumento de la mineralización de las aguas sub-

terráneas dando lugar a aguas con altos contenidos en sulfatos, cloruros y sodio, que puntualmente son aprovechadas para uso industrial. El calcio destaca como catión más abundante. Entre los aniones sobresalen los bicarbonatos y los sulfatos.

Las diferentes litologías de la zona, se manifiestan en aguas adecuadas para riego (tipo C₃S₁) así mismo encontramos algunas aguas de elevada carga mineral no recomendables para riego. Existe contaminación por nitratos procedentes de actividades agrícolas (fertilización de cultivos tradicionales: olivar y viñedo) aunque también se apunta otros focos de contaminación difusa de origen no agrícola, tales como contaminaciones fecales de carácter localizado.

La mezcla de aguas de distintas facies hidroquímicas es muy posible. Especialmente en las aguas procedentes de manantiales que son mezclas variables de aguas subterráneas profundas con otras de circulación local y menos mineralizadas.

Explicar la interacción entre la subzona de El Cuadrado-Cerro del Acirate y el acuífero principal queda fuera del alcance de este trabajo. Por último, indicar que los datos analíticos obtenidos son suficientes para obtener una visión general de la calidad química del agua subterránea en distintos puntos de este acuífero detrítico, pero por el momento son insuficientes para establecer modelos de estudio sobre los procesos hidroquímicos modificadores.

REFERENCIAS

- Alonso Otero, F. (1999). Historia y desarrollo de investigaciones sobre el modelado kárstico en Andalucía. En Duran Valsero, J.J.; J. Lopez Martínez. (Ed.). *Karst en Andalucía*. I.T.G.E. Madrid.
- Asociación Española de Normalización y Certificación. (1993). Calidad del agua. Determinación de la conductividad eléctrica. UNE 27888. Madrid: AENOR.
- Ayers, R.S. y D.W. Wescott. (1994). Water quality for Agriculture. *Riego y Drenaje* nº29. Estudio FAO. Roma.
- Barrantes, F.; B. Falero; M.C. González; J.F. García; M. Pérez; J.M. Cuenda (1992). *Interpretación de análisis de suelo, foliar y agua de riego*. Ed. Mundi prensa y Junta de Extremadura. Madrid.
- Coma, J.E. y C. Felgueroso (1967). "Estudio hidrogeológico de la parte más meridional de la provincia de Córdoba. Área situada en las hojas de Lucena, Puente Genil, Baena y Montilla". B.I.G.M.E., vol. LXXVIII, p. 49-92.

- Custodio, F. y M.R. Llamas. (Dir.) (2001). *Hidrología subterránea*. Ed. Omega. Barcelona. 2 vol.
- De León, A.; A. Arriba; M.C. De la Plaza (1989). *Caracterización agroclimática de la provincia de Córdoba*. M.A.P.A. Madrid.
- Durán, J.J.; J. López y M. Vallejo (1999). "Distribución, caracterización y síntesis evolutiva del karts en Andalucía". En Duran Valsero, J.J.; J. Lopez Martínez. (Ed.). *Karst en Andalucía*. I.T.G.E. Madrid
- Felgueroso, C. y J.E. Coma (1964). "Estudio geológico de la zona sur de la provincia de Córdoba". *B.I.G.M.E.*, vol. LXXV, p.111-209. Madrid.
- Fernández, N.; G. De las Casas; R. Cabrera; M. Remón; J.C. Roth (1999). *Caracterización del uso potencial del suelo de la provincia de Córdoba: clases agrológicas*. Informaciones Técnicas 62/99. Junta de Andalucía. Sevilla.
- García del Barrio, I.; F. Sanz; L. Lopez (1980). *El viñedo, el clima y el suelo de Montilla-Moriles*. Ministerio de Agricultura. Madrid.
- I.G.M.E. (1988). Memoria del Mapa geológico de España. Escala 1:50.000, nº966 (16-39) "Montilla". Madrid.
- I.T.G.E. (1995). Mapa hidrogeológico de España. Escala 1:200.000, nº76 (4-10) "Córdoba". Madrid.
- I.T.G.E.-Junta de Andalucía (Ed.)(1998). *Atlas Hidrogeológico de Andalucía*. Madrid.
- López Ontiveros, A. (1973). "Rasgos geomorfológicos de la Campiña de Córdoba". *Estudios Geográficos*, 130, p. 33-94
- Marín Galvín, R. (1996). *Química, microbiología, tratamiento y control analítico de aguas: una introducción al tema*. Servicio de publicaciones de la Universidad de Córdoba.
- Ministerio de la Presidencia. (2003). Real Decreto 140/2003, de 7 de febrero, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano. Boletín Oficial del Estado núm. 45 de 21 de febrero.
- Parlamento Europeo, Consejo de la Unión Europea. Directiva 98/83/CE de 3 de noviembre de 1998, relativa a la calidad de las aguas destinadas al consumo humano. Diario Oficial de las Comunidades Europeas 1998-12-05; (L330/32)
- Parkhurst, D.L. (1995). User's guide to PHREEQC-A computer program for speciation, reaction-path, advective transport, and inverse geochemical calculations. *U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 95-4227*.
- Pulido, A. (1999). Principales rasgos hidrogeológicos de los macizos kársticos andaluces. En Duran Valsero, J.J.; J. Lopez Martínez. (Ed.). *Karst en Andalucía*. I.T.G.E. Madrid.
- Rodier, J. (1989). *Análisis de aguas*. Ed. Omega. Barcelona.
- Rubio Navas, J. (1997). Inventario nacional de recursos minerales de cloruro sódico y sales potásicas. ITGE. Madrid.
- Sacks, L.A. (1996). Geochemical and isotopic compositions of ground water with emphasis on sources of sulfate in the Upper Floridan aquifer in parts of Marion, Sumter, and Citrus Counties, Florida. *U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 95-4251*.
- Sanchez, I.; J. Gil; M. Medina; L. Corral; B. Paneque (1983). "Aspectos químicos agrícolas de suelos representativos del marco Montilla-Moriles". *Ann. Edaf. Y Agrobiol.* XLII (1-2): p.105-146.
- Skoog, D.A.; D.M. West; F.J. Holler (2003). *Fundamentos de Química Analítica*. Ed. Reverté. Barcelona.
- Wakida, F.T. y D.N. Lerner (2005). Non-agricultural sources of groundwater nitrate: a review and case study. *Water Research*, 39, p. 3-16
- Wood, W. W. (1981). *Guidelines for collection and field analysis of ground-water samples for selected unstable constituents: Techniques of water-Resources Investigations of the United States Geological Survey*. U.S.Geological Survey, book 1, chap. D2 Washington.