

Evaluación del riesgo de contaminación de las aguas subterráneas. Aplicación a los acuíferos carbonáticos de la Sierra de Cañete (sur de España)

A. Jiménez Madrid⁽¹⁾, C. Martínez Navarrete⁽¹⁾ y F. Carrasco Cantos⁽²⁾

(1) Instituto Geológico y Minero de España. C/ Ríos Rosas, 23. 28003 Madrid
a.jimenez@igme.es; c.martinez@igme.es

(2) Grupo de Hidrogeología de la Universidad de Málaga
f.carrasco@uma.es

RESUMEN

En este trabajo se evalúa el riesgo de contaminación de las aguas subterráneas como primera medida para el establecimiento de zonas de salvaguarda de las masas de agua subterránea destinadas al consumo humano. Para ello, se ha partido del mapa de peligrosidad de las actividades antrópicas existentes y de la cartografía de vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos carbonáticos de la Sierra de Cañete. La metodología utilizada para determinar el riesgo de contaminación es la indicada por la Acción COST 620 desarrollada para la protección de las aguas de los acuíferos kársticos, aunque se ha cambiado la vulnerabilidad obtenida mediante el método PI, por la realizada por el método COP debido a que este último ha sido el utilizado por el estado español para determinar la vulnerabilidad de los acuíferos carbonáticos de todas las cuencas intercomunitarias del territorio nacional. Esto ha motivado proponer unos nuevos intervalos de los distintos tipos de riesgo adecuados a esta metodología.

Los análisis químicos realizados en una red de control de la calidad química del agua subterránea parecen indicar la existencia de contaminación solo en un sector de los acuíferos investigados lo que puede ser en principio coherente con los resultados obtenidos del análisis del riesgo.

Palabras clave: peligrosidad, protección de aguas subterráneas, riesgo, SIG, vulnerabilidad

Groundwater pollution risk assesment. Application to carbonate aquifers of Cañete mountain range (south of Spain)

ABSTRACT

In this work groundwater pollution risk is evaluated as the first measure for the establishment of safeguard zones of the groundwater bodies destined for human consumption. To do this, we have split of the map of dangerousness of the human activities existing and of the cartography of intrinsic vulnerability of these carbonate aquifers of Cañete Mountain Range.

The methodology used to determine the risk of pollution is as indicated by the COST Action 620 developed for the protection of the waters of the karstic aquifers, though the vulnerability obtained by means of the method PI has changed, for the realized one for the method COP due to the fact that the latter has been the used by the Spanish state to determine the vulnerability of the carbonate aquifers of all the intercommunal basins of the national territory. This has motivated the proposal of a few new intervals of the different types of risk appropriate to this methodology.

The chemical analyses carried out in a control network of the chemical quality of the groundwater seem to indicate the existence of pollution only in a sector of the investigated aquifers ones what can be at first coherent with the results obtained of the risk analysis.

Key words: GIS, groundwater protection, hazard, risk, vulnerability

Introducción

La protección del agua subterránea se ha convertido en uno de los objetivos medioambientales prioritarios en las políticas europeas con la entrada en vigor en el año 2000 de la Directiva Marco del Agua, DMA, Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del

Consejo (Unión Europea, 2000), y más específicamente en 2006 con la Directiva 2006/118/CE (Unión Europea, 2006), relativa a la protección de las aguas subterráneas contra la contaminación y el deterioro.

En España son numerosas las poblaciones que se abastecen de aguas subterráneas, de ahí la necesidad de obtener una metodología para el establecimiento

de zonas de salvaguarda como figura de protección más adecuada, contemplada en el artículo 7.3 de la DMA. En estas zonas se centraran las medidas de protección necesarias para preservar la calidad de las aguas subterráneas y equivalen a "perímetros de protección" de masas de agua subterránea (Jiménez Madrid *et al.*, 2008).

La metodología a desarrollar para el establecimiento de zonas de salvaguarda debe contemplar, entre otros factores, el riesgo de contaminación de las aguas subterráneas empleadas para consumo humano. Por ello en el presente trabajo se analiza este riesgo como paso necesario para elaborar una metodología de protección adecuada implantándola en acuíferos carbonáticos del Sur de España (la Sierra de Cañete) como zona piloto.

El concepto de riesgo hace referencia a la probabilidad de contaminación de las aguas subterráneas como consecuencia de la actividad humana. Según el

método propuesto en la Acción COST 620 (Hötzl *et al.*, 2004), el riesgo de contaminación se obtiene a partir de la combinación de la peligrosidad de las actividades ubicadas sobre el acuífero y de la vulnerabilidad de este último. Así, una zona donde la vulnerabilidad del acuífero sea alta y además existan actividades potencialmente contaminantes, tendrá un riesgo de contaminación elevado.

El presente trabajo tiene como objetivo adaptar la metodología propuesta en la Acción COST 620 (Zwahlen, 2004) para su aplicación en acuíferos carbonáticos de España mediante la utilización del método de evaluación de la vulnerabilidad intrínseca a la contaminación COP (Vías *et al.*, 2004; Vías, 2005) en lugar del método PI (Goldscheider *et al.*, 2000), debido a que el primero ha sido el utilizado por el estado español para determinar la vulnerabilidad de los acuíferos carbonáticos de todas las cuencas intercomunitarias del territorio nacional. Todo ello, con obje-

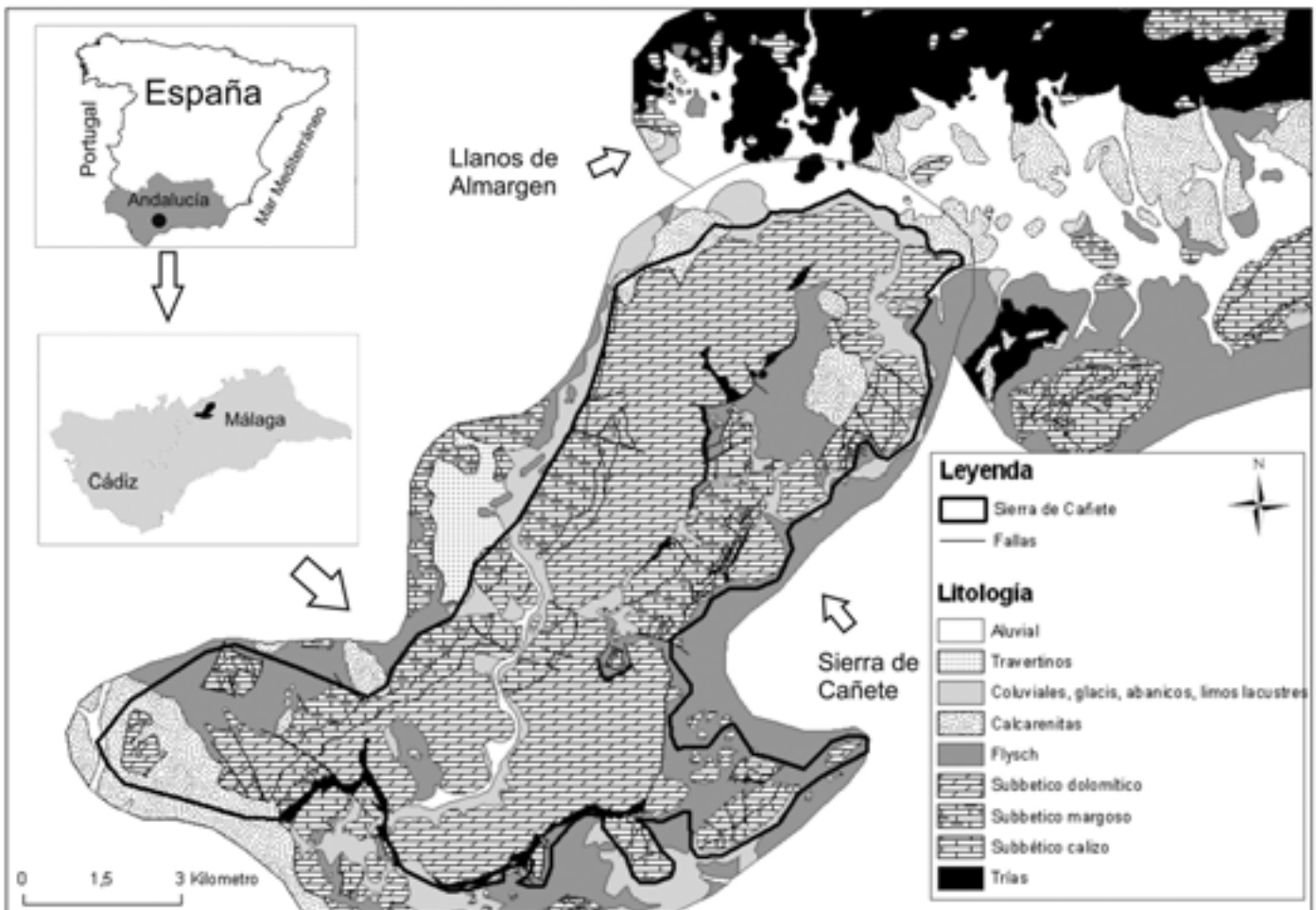


Figura 1. Localización de la zona de estudio. Marco geológico
Figure 1. Location of the study area. Geological context

to de integrar la evaluación del riesgo a la contaminación en una metodología de protección adecuada para las aguas subterráneas empleadas para consumo humano. El método COP ha sido aplicado con éxito en varios acuíferos del Sur de España en comparación con otros métodos de evaluación de la vulnerabilidad (Vías *et al.*, 2004; Vías, 2005). También se ha aplicado en otros lugares del mundo (Vías *et al.*, 2006a; Ravbar, 2007; Baldi *et al.*, 2009). Para comprobar la posible existencia de contaminación en las aguas subterráneas de la región estudiada se ha definido una red de control de toma de muestras (Carrasco *et al.*, 2008) cuyo análisis nos ha permitido comparar el riesgo de contaminación obtenido con la situación actual de los acuíferos.

Zona de estudio. Marco geológico e hidrogeológico

La zona de estudio (Sierra de Cañete) está situada en el Sur de la península Ibérica (Figura 1). Se localiza, en su mayor parte, en el borde noroccidental de la provincia de Málaga, aunque también se adentra (por el sur) en la provincia de Cádiz. Constituye una alineación montañosa de orientación general SO-NE, con unos 55 km² de superficie y altitud comprendida entre 500 y 1.000 m s.n.m. La pendiente alcanza valores máximos del 74 % en algunas zonas aunque predominan los valores inferiores al 30 %.

En la Sierra de Cañete y su entorno existen materiales pertenecientes a varios dominios geológicos de la Cordillera Bética. En el sector central afloran dolomías y calizas jurásicas, margas cretácicas y materiales detrítico-arcillosos del Oligoceno-Mioceno, atribuidos al Penibético. Sobre ellos, se encuentran arcillas triásicas, dolomías y calizas jurásicas del Subbético que constituyen la mayor parte de la sierra. Entre ambos dominios y también rodeando a la sierra se encuentran materiales arcillosos terciarios del Flysch del Campo de Gibraltar. El Terciario postorogénico está constituido por calcarenitas, conglomerados y margas del Mioceno superior que junto con los depósitos cuaternarios (aluviales, formaciones de ladera y travertinos) ocupan sectores marginales. Los materiales postorogénicos se desarrollan ampliamente en los Llanos de Almargen al norte de la región estudiada (Figura 1).

La estructura geológica que presenta la Sierra de Cañete es un antiformal que integra las dos unidades tectónicas subbéticas separadas por materiales del Flysch del Campo de Gibraltar. La unidad inferior está formada por los materiales del Penibético, que afloran a modo de ventana tectónica, bajo la unidad superior, constituida por los materiales del Subbético.

El conjunto de rocas carbonáticas jurásicas que afloran en la Sierra de Cañete son permeables por fisuración y karstificación y constituyen varios acuíferos debido a la existencia de compartimentos originados por causas tectónicas (Junta de Andalucía, 2002; Linares y Carrasco, 2007) (Figura 2). Los recursos hídricos de seis de ellos se utilizan para abastecimiento de ocho municipios de pequeñas dimensiones, con menos de 5.000 habitantes, excepto uno de ellos que posee una población cercana a 8.000 habitantes. Por el Este y Oeste la Sierra de Cañete está limitada por materiales del Flysch del Campo de Gibraltar. Al Sur encontramos calcarenitas del Mioceno de Setenil-Ronda. Por el límite Norte conecta con materiales aluviales cuaternarios y los sedimentos miocenos que existen en los Llanos de Almargen los cuales constituyen un acuífero por porosidad intergranular cuya alimentación se produce por la infiltración del agua de lluvia, y por aportación desde los acuíferos carbonatados de la Sierra de Cañete.

Metodología

El riesgo de contaminación del agua subterránea, en el marco de la Acción COST 620, forma parte del modelo tipo "Origen-Pathway-Target", donde la contaminación de la misma (target) se evalúa a partir de las fuentes potenciales de peligro (origen) y vulnerabilidad del acuífero (pathway) (Daly *et al.*, 2002).

Determinación de las presiones sobre las aguas subterráneas y evaluación de su peligrosidad

Según la DMA una presión es toda aquella actividad originada por el hombre que puede tener un efecto medioambiental desfavorable en el agua (tanto en calidad como en cantidad). En función de su naturaleza, las presiones se clasifican en cinco tipos: fuentes de contaminación puntuales, fuentes de contaminación difusas, extracciones de agua, recargas artificiales e intrusión marina.

En la Sierra de Cañete se ha realizado un inventario de presiones tomando como base el catálogo de fuentes de contaminación propuesto por el grupo de trabajo de la Acción Europea COST 620 (De Keteleare *et al.*, 2004). La evaluación de la peligrosidad de cada una de las presiones se ha efectuado según la metodología propuesta en el marco de la citada Acción, basada en tres parámetros: nocividad de la actividad contaminante (H), intensidad de la contaminación (Qn) y probabilidad de ocurrencia de un evento de

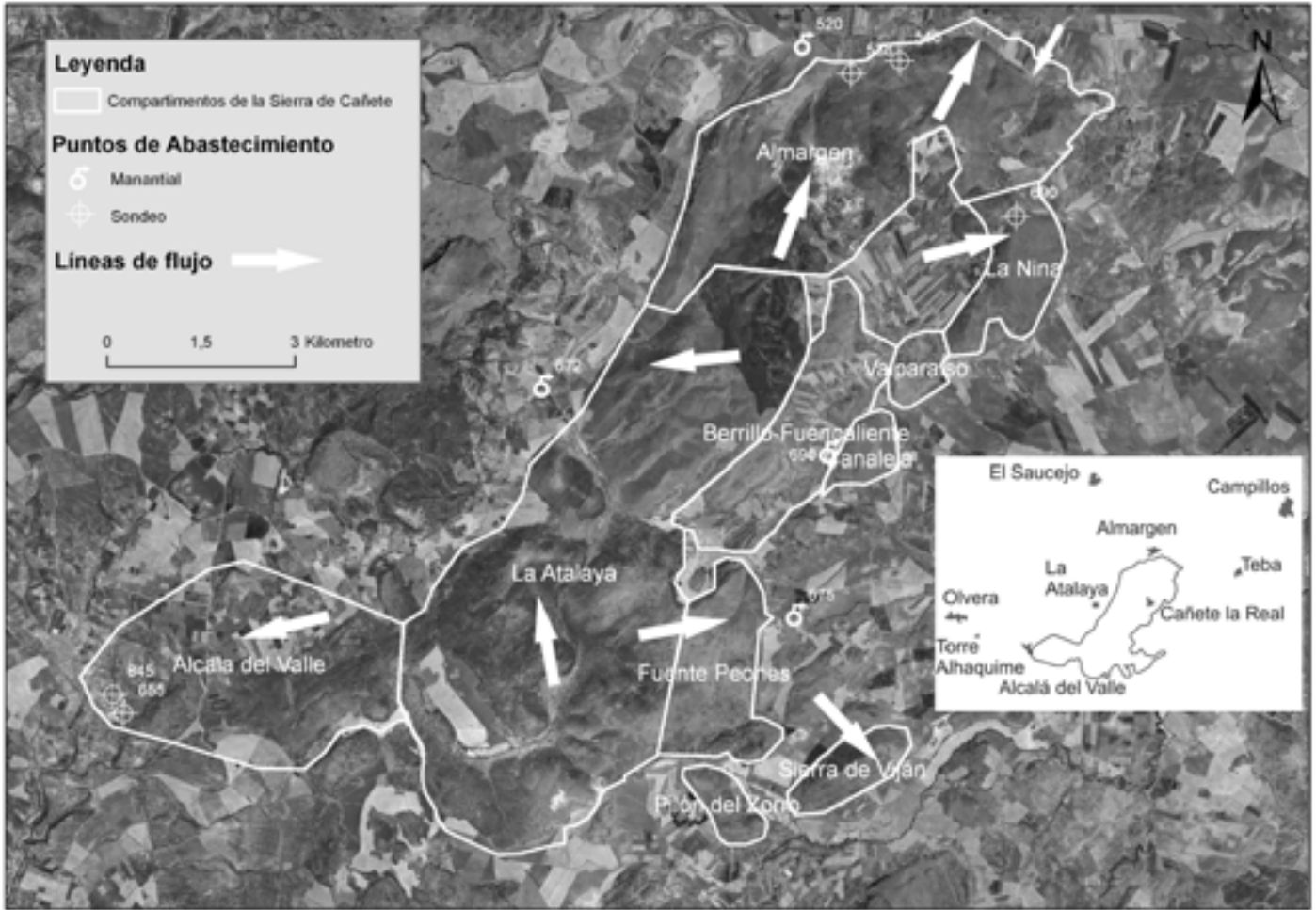


Figura 2. Compartimentos hidrogeológicos de la Sierra de Cañete. Situación de los puntos de abastecimiento y poblaciones que se abastecen de los acuíferos

Figure 2. Hydrogeological compartments in Cañete Mountain Range. Situation of supply points and of the towns supplied by the aquifer

contaminación (Rf). El valor de H viene definido por el método, puntuación realizada por un comité de expertos europeos, con valores comprendidos entre 10 y 100 para cada actividad. Los otros dos factores Qn y Rf permiten matizar en alza o a la baja la valoración inicial. El factor Qn varía entre 0,8 y 1,2 y en nuestro caso se ha puntuado según la dimensión del peligro a partir de su identificación en el campo, mientras que al factor Rf (cuyo valor varía entre 0 y 1) se le ha dado la mayor puntuación con objeto de no disminuir la peligrosidad de la actividad, tal como recomienda el método, ya que no existen datos suficientes que demuestren que la probabilidad de contaminación es baja.

El índice de peligrosidad HI se obtiene mediante el producto de los tres factores y puede variar entre un valor mínimo de 0 y un máximo de 120 (Tabla 2):

$$HI = H \cdot Qn \cdot Rf$$

Evaluación de la vulnerabilidad intrínseca a la contaminación

Los mapas de vulnerabilidad a la contaminación son instrumentos muy útiles para la toma de acciones preventivas, con respecto al uso del suelo y explotación de los recursos hídricos. Su objetivo es la subdivisión del área en categorías según la capacidad que tiene el medio subsuperficial para proteger el agua subterránea. Puede distinguirse entre vulnerabilidad intrínseca y específica (Vrba y Zaporozec, 1994; Zwahlen, 2004). La vulnerabilidad intrínseca es la susceptibilidad del agua subterránea a la contaminación generada por la actividad humana en función de las

características geológicas, hidrológicas e hidrogeológicas de un área pero independientemente de la naturaleza de los contaminantes. La vulnerabilidad específica es la susceptibilidad del agua subterránea a un contaminante o grupo de contaminantes concreto en función de las características de éstos y sus relaciones con los componentes de la vulnerabilidad intrínseca.

Se han desarrollado diferentes métodos para la determinación de la vulnerabilidad siguiendo distintos enfoques (Aller *et al.*, 1987; Foster, 1987; Dörfliger, 1996; Civita y de Maio, 1997; Gogu y Dassargues, 2000; Goldscheider *et al.*, 2000; Zwahlen, 2004 y Vías *et al.*, 2006b). Existen varios métodos para evaluar la vulnerabilidad intrínseca a la contaminación en los acuíferos carbonáticos, entre ellos caben destacar los métodos EPIK (Dörfliger, 1996), PI (Goldscheider *et al.*, 2000) y COP (Vías *et al.*, 2006b). Este último se ha seleccionado para evaluar la vulnerabilidad de los acuíferos carbonáticos de las cuencas intercomunitarias de España y por ello también se ha utilizado en este trabajo. El método utiliza tres factores: C (concentración de flujo), O (protección del agua subterránea) y P (precipitación). El factor O tiene en cuenta la capacidad de protección que de modo natural tiene el acuífero según las capas que constituyen la zona no saturada, el factor C considera la existencia de concentración de flujos y de infiltración rápida a través de conductos kársticos que reducen la capacidad

natural de protección del acuífero y el factor P depende de las características pluviométricas que determinan el transporte del contaminante por el agua de lluvia desde la superficie a la zona saturada del acuífero. El índice COP se calcula mediante el producto de los tres factores indicados y sus valores varían entre 0 y 15 agrupados en cinco clases de vulnerabilidad (Tabla 2), indicando los valores más bajos mayor vulnerabilidad.

Para la evaluación de cada uno de los factores del método COP se han utilizado diversas fuentes de información que se resumen en la tabla 1.

Análisis del riesgo de contaminación de las aguas subterráneas

La evaluación del riesgo de contaminación de las aguas subterráneas ha sido abordada por diferentes autores sin existir consenso en los factores a analizar ni en el método a utilizar (Aller *et al.*, 1987; Foster, 1987; Foster e Hirata, 1988; Civita y de Maio, 1997; Ducci, 1999; Hötzl, 2004).

El mapa del riesgo de contaminación de las aguas subterráneas efectuado en la Sierra de Cañete está basado en la valoración del índice de intensidad del riesgo (RII) indicada por Hötzl *et al.*(2004) en el marco de la Acción COST 620. Este índice se obtiene a partir del cociente entre el índice de vulnerabilidad obteni-

COP					
Factor	Fuente de información	Mínimo	Máximo	Media	Desviación estándar
Concentración de flujo (C)	Análisis geomorfológico de campo. Espeleología. Ortofotos. Mapa usos del suelo de Andalucía 1:100.000 (Junta de Andalucía, 1999)	0,5	0,1	0,3	0,1
Capa Protección (O)	Hoja MAGNA 1037 (1:50.000) (Cruz-Sanjulián, 1991). Hoja LUCDEME 1037 (1:100.000). Piezometría red de control Sierra de Cañete (Carrasco <i>et al.</i> , 2008). MDT 10x10 (Junta de Andalucía, 2005). Trabajos de campo.	5	1	2,9	1,3
Precipitación (P)	Red pluviometría Sierra de Cañete (Jiménez Madrid, 2008). Agencia estatal de meteorología.	0,7	0,6	0,6	0,02

Tabla 1. Fuentes de información utilizadas para la aplicación del método COP. Valores asignados
 Table 1. Information used for the application of the COP method. Assigned values

do con el método PI y el índice de peligrosidad (HI) definido en el apartado anterior:

$$RII = (1 / HI) \cdot PI$$

Para la realización de este trabajo se ha considerado más apropiado utilizar el índice de vulnerabilidad obtenido con el método COP, conforme se sintetiza en la tabla 2. El método COP ha sido aplicado con éxito en varios acuíferos carbonáticos del sur de España (Andreo *et al.*, 2006, Vías, 2005; Vías *et al.*, 2006b). También se ha utilizado en otros países comprobándose su idoneidad para este tipo de medio en comparación con otros métodos específicos de los acuíferos carbonáticos.

Las diferentes cartografías temáticas se han obtenido a partir de la utilización de un Sistema de Información Geográfica (SIG). Para la puntuación, superposición de capas así como su tratamiento conjunto se han utilizado herramientas de análisis espacial del software ArcGis 9.3.

Características hidroquímicas

Como apoyo de contraste a la evaluación del riesgo de contaminación de las aguas subterráneas en la Sierra de Cañete se han realizado análisis químicos de componentes mayoritarios y minoritarios correspondientes a tres campañas de muestreo efectuadas en 15 puntos (14 manantiales y sondeos de los acuíferos carbonáticos y uno del acuífero de los Llanos de Almargen).

Las campañas de muestreo fueron realizadas en

Enero, Abril y Julio de 2008 y las muestras fueron recogidas en un solo día para cada campaña. Los procedimientos de ensayo realizados son la Electrometría, Espectrometría de Emisión Atómica, Espectrofotometría de Absorción Atómica y Espectrometría de Absorción con Autoanalizador de flujo continuo con un nivel de confianza del 95%. Se ha decidido presentar los datos correspondientes a las concentraciones máximas de cada parámetro con objeto de considerar las condiciones más desfavorables para su posterior contraste con la evaluación del riesgo realizada.

Resultados y discusión

Los primeros resultados obtenidos acerca de las presiones existentes (Tabla 3 y Figura 3) permiten evaluar la peligrosidad dominante en la zona como de tipo baja y sólo existen presiones puntuales y lineales de peligrosidad moderada (Jiménez Madrid, 2008).

La mayoría de las presiones identificadas son evaluadas con peligrosidad baja debido a que están relacionadas con contaminantes de una escasa nocividad como las extensiones de cultivo de secano o los establos de ganado. Las presiones evaluadas con peligrosidad moderada corresponden a las EDAR y gasolineras debido principalmente al vertido de aguas fecales sin tratamiento terciario de depuración así como el uso de hidrocarburos respectivamente. Puntualmente también existe peligrosidad moderada en algunas granjas porcinas y sus balsas de purines (muy abundantes en los Llanos de Almargen). Éstas son una de las principales presiones que encontra-

ÍNDICE COP		ÍNDICE HI		1 / HI	RII= COP * 1 / HI	Clases Riesgo
Factor	Clases	Factor	Clases			
4-15	Muy baja	0-24	Muy baja	>0,042	>0,168	Muy bajo
2-4	Baja	24-48	Baja	0,042-0,021	0,168-0,042	Bajo
1-2	Moderada	48-72	Moderada	0,021-0,014	0,042-0,014	Moderado
0,5-1	Alta	72-96	Alta	0,014-0,010	0,014-0,005	Alto
0-0,5	Muy Alta	96-120	Muy Alta	<0,010	<0,005	Muy alto

Tabla 2. Límites del Índice de intensidad del riesgo (RII) y Clases de riesgo propuestos en este trabajo
 Table 2. Limits of Risk Intensity Index (RII) and Risk category proposed in this work

PRESIONES	ENTIDAD	NÚMERO DE PUNTOS, LONGITUD (Km) O SUPERFICIE (Km²)	ÍNDICE DE PELIGROSIDAD	GRADO PELIGROSIDAD
Núcleo urbano	Punto	1	35	Bajo
Casa aislada sin red de alcantarillado	Punto	53	45	Bajo
Albergue, áreas recreativas	Punto	4	24-30	Bajo
Hotel, restaurante	Punto	3	30	Bajo
Cementerio	Punto	2	20	Muy Bajo
EDAR	Punto	2	50	Moderado
Gasolinera	Punto	1	48	Moderado
Surtidor de gasoil	Punto	1	60	Moderado
Pista polideportiva	Punto	2	25	Bajo
Carreteras, ferrocarril	Línea	28 km	30-48	Bajo-Moderado
Industria	Punto	9	32-50	Bajo-Moderado
Escombrera y deposito de materiales	Punto	9	35-42	Bajo
Canteras	Polígono	0,9 km ²	25	Bajo
Talleres	Punto	5	40	Bajo
Vertedero sellado	Punto	1	40	Bajo
Cooperativas agropecuarias	Punto	2	30	Bajo
Plantación de cipreses, palmeras, invernaderos, huertos	Punto	44	30	Bajo
Cultivos de secano, áreas de pastoreo	Polígono	39,09 km ²	25	Bajo
Cultivos de regadío	Polígono	1,2 km ²	24	Bajo
Establos de ganado	Punto	101	30	Bajo
Ganadería porcina extensiva	Punto	7	35	Bajo
Vertido de purines y aguas residuales sin depurar	Punto	5	45	Bajo
Balsa de purines	Punto	39	45-54	Bajo-Moderado
Criadero de aves y abejas	Punto	2	35	Bajo

Tabla 3. Inventario de presiones en la Sierra de Cañete y evaluación de su peligrosidad
Table 3. Inventory of pressures in Cañete Mountain Range and assessment of the Hazard presented by each

mos en la Sierra de Cañete, en ellas, la cría de animales estabulados se hace en instalaciones donde las deyecciones, agua de lavado y desperdicios de pienso y agua de bebida se depositan en balsas. Todos estos residuos producen el denominado purín, el cual está caracterizado por un gran volumen, altos contenidos de materia orgánica, riqueza de nitrógeno am-

niacal y microorganismos de origen fecal. Este residuo es utilizado como fertilizante por muchos ganaderos ya que riegan con purín terrenos generalmente colindantes a la ubicación de las distintas granjas.

Ateniéndonos a los resultados, cabe la posibilidad de modificar el método aplicado ya que no considera el análisis de las presiones por proximidad así como

por coincidencia (existen presiones iguales en un radio muy pequeño así como la presencia de varias presiones diferentes en una misma zona). Por ello, sería necesario adaptar la metodología aplicada mediante una sumatoria de las presiones existentes en cada una de las celdas en las que se divide el territorio lo cual llevaría a un aumento de la peligrosidad en esa área. Otra alternativa sería caracterizar cada área con la presión de peligrosidad más alta de todas las que coexistan en ella.

La figura 4 muestra los resultados obtenidos tras evaluar la vulnerabilidad intrínseca a la contaminación de los acuíferos carbonáticos de la Sierra de Cañete mediante el método COP. Destaca el predominio de las clases de vulnerabilidad muy alta y alta (más del 52 % de ocupación del territorio entre ambas) (Jiménez Madrid *et al.*, 2009). La abundancia

de estas clases de vulnerabilidad se debe al peso que ejerce en el resultado final el parámetro O. Estas zonas se corresponden con el afloramiento de materiales calizos y de suelos del tipo leptosoles, suelos con escasa cubierta protectora que hacen que la protección de las aguas subterráneas sea baja. La altitud media predominante en la Sierra de Cañete junto con la relativa pequeña extensión de la zona de estudio origina escasa variación pluviométrica, por lo que el parámetro P influye en menor proporción para obtener diferentes clases de vulnerabilidad. La inexistencia de sumideros kársticos importantes provoca que el factor C tampoco tenga una influencia excesiva en el resultado final. Los valores máximos, mínimos, medios y desviación de cada factor, asignados según los fundamentos del método, se pueden visualizar en la tabla 1.

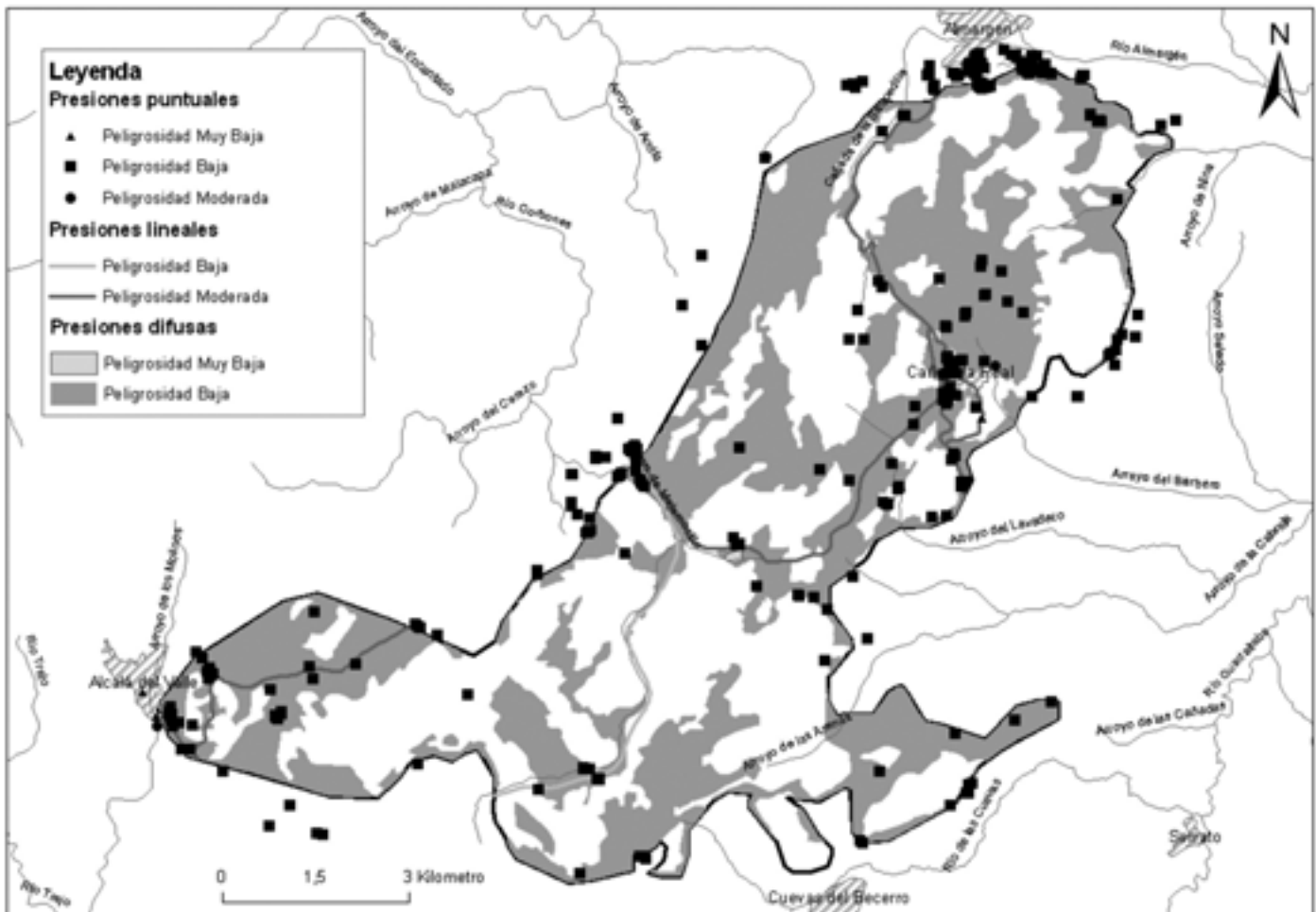


Figura 3. Situación y evaluación de la peligrosidad de las presiones en la Sierra de Cañete
Figure 3. Situation and evaluation of the Hazard presented by current pressures in Cañete Mountain Range

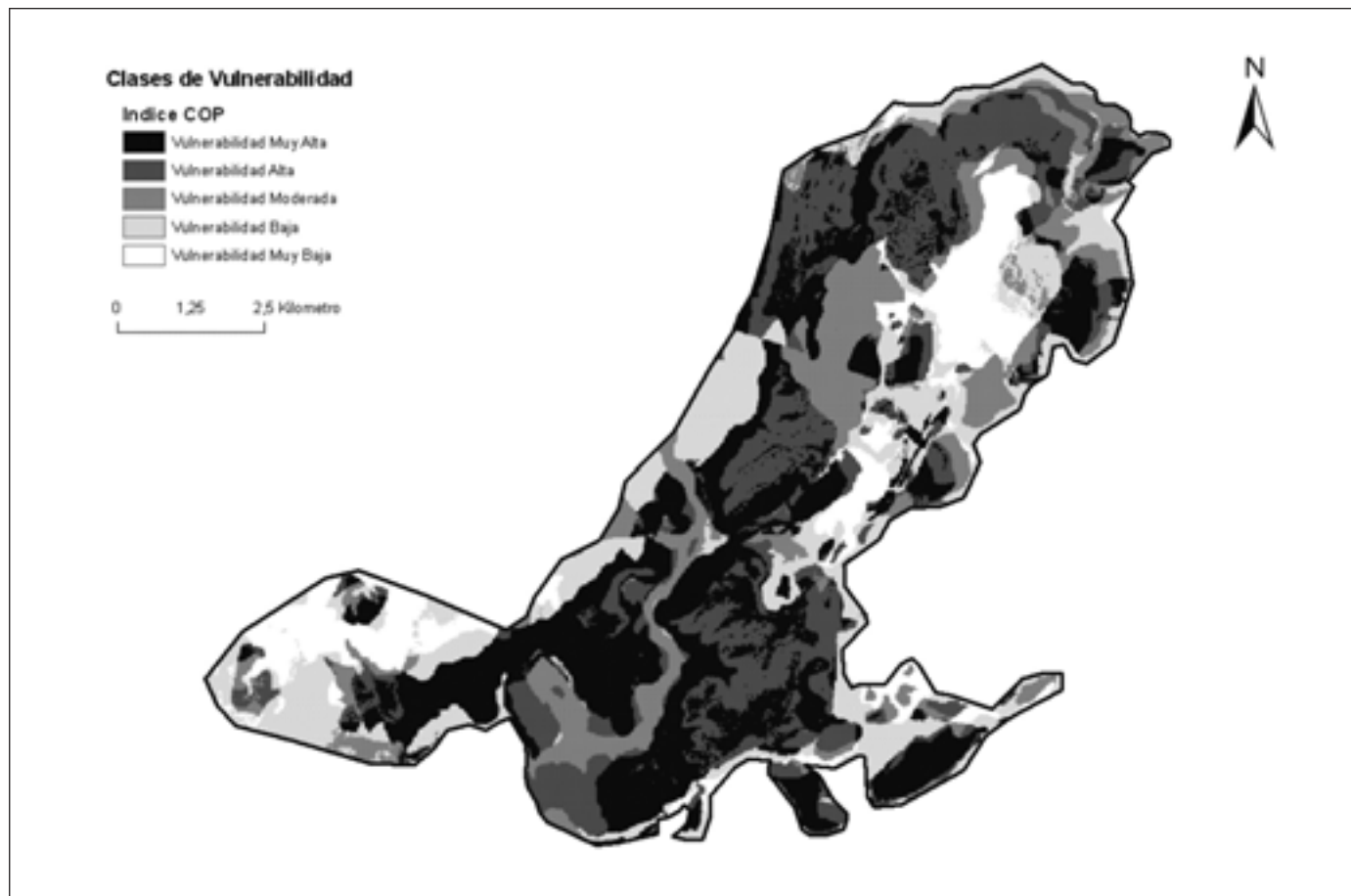


Figura 4. Vulnerabilidad a la contaminación según el método COP en la Sierra de Cañete
Figure 4. Contamination vulnerability according to the COP method, in Cañete Mountain Range

En resumen, los acuíferos carbonáticos de la Sierra de Cañete son bastante vulnerables a la contaminación ya que las clases alta y muy alta representan más del 50 % de la extensión de la zona de estudio, mientras que las clases baja y muy baja ocupan algo más del 20 % del territorio.

Los resultados obtenidos tras la evaluación del riesgo de contaminación de las aguas subterráneas en los acuíferos carbonáticos de la Sierra de Cañete muestran un predominio de la clase muy baja y baja (55% y 27 % de la superficie total respectivamente) (Figura 5). Estas clases están representadas en todos los acuíferos y coinciden con el afloramiento de materiales de baja permeabilidad y la ausencia de presiones. La clase de riesgo moderada supone un 15 % de la extensión del área de estudio y ocupa principalmente la zona de canteras situada en el sector noroccidental de la Sierra de Cañete. Las zonas de riesgo alto (4 %) y muy alto (0.1 %) están escasamente representadas y se localizan allí donde la vulnerabilidad es

muy alta y existen presiones con peligrosidad baja-moderada (Figura 5).

Según estos resultados sólo en el sector noroccidental de la sierra las zonas de riesgo moderado-alto ocupan una extensión del territorio considerable en comparación con el resto de los compartimentos. Estas zonas se corresponden con áreas de pastoreo y de extracción de áridos.

Como complemento al análisis del riesgo realizado se presentan los resultados hidroquímicos (Tabla 4) de los puntos de muestreo localizados en la figura 5. Los análisis químicos realizados en el laboratorio homologado del IGME presentan un error en el balance iónico inferior al 5 %. Las conductividades de todos los puntos se encuentran entre valores de 500-700 $\mu S/cm$ a excepción de los puntos C, G y O donde encontramos valores de 2.500 $\mu S/cm$ en el primero de ellos y de 1.500-1.300 $\mu S/cm$ en los otros dos puntos.

Los resultados muestran que, en general, no existen evidencias de contaminación de tipo químico en

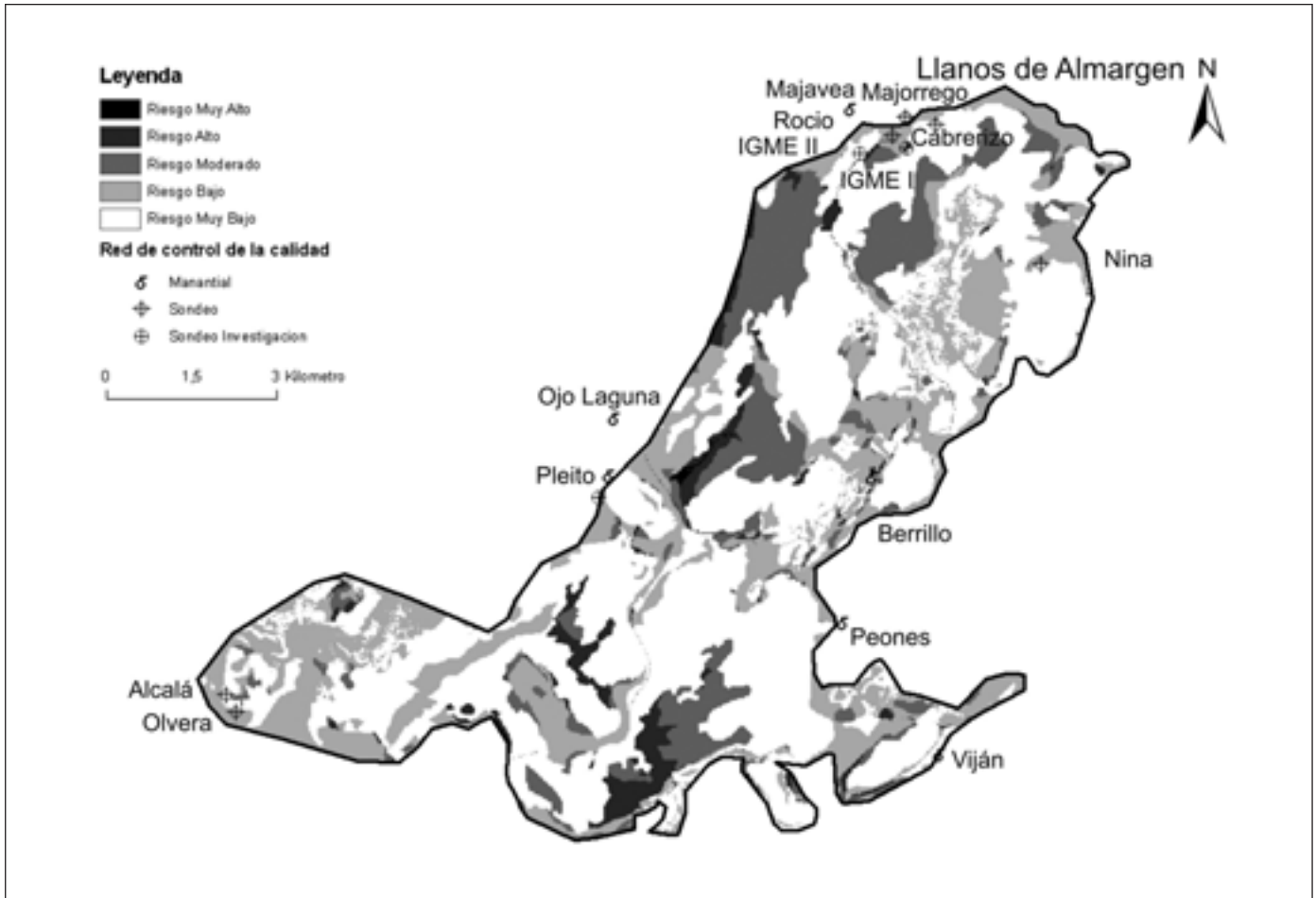


Figura 5. Riesgo de contaminación de las aguas subterráneas en la Sierra de Cañete y red de control de la calidad de las aguas subterráneas

Figure 5. Groundwater pollution risk in Cañete Mountain Range and control networks of groundwater quality

la mayor parte del sector estudiado, con excepción de la parte septentrional (punto C) y en el acuífero detrítico de los Llanos de Almargen (punto O). En algunos puntos de observación (F, G, J, M y N) existen concentraciones relativamente más altas en algunos de los elementos analizados que se pueden interpretar como debidas a un proceso de disolución de evaporitas (yeso y halita) del Trías, por ejemplo la mayor concentración de sulfatos en los puntos C, F, M y N, los valores altos de calcio en los puntos C y O ó la abundancia de cloruros y sodio en los puntos G y J, cómo puso de manifiesto Carrasco (1986) en una zona próxima al área estudiada.

La contaminación existente en el acuífero detrítico de los Llanos de Almargen (punto O) podría deberse a la actividad agrícola y ganadera que sobre él se desarrolla (Jiménez *et al.*, 2007; Martínez *et al.*, 2008) dada la elevada concentración de nitratos en

varias de las muestras analizadas (próximo a 30 mg/l en los puntos C y O). Si la concentración de nitratos es más elevada que 10 mg/l en el agua subterránea, es indicadora de contaminación de origen antrópico (Sener, E. *et al.*, 2009). La contaminación puntual que parece observarse en el sector septentrional de la Sierra de Cañete (punto G) puede estar más relacionada con las presiones en los Llanos de Almargen adyacentes a la masa de agua carbonatada que con las presiones que existen en la Sierra de Cañete debido a que las concentraciones de los parámetros químicos analizados se asemejan más al punto de muestreo situado en el acuífero aluvial que al resto de puntos situados sobre los materiales carbonatados, tal como parece indicar el diagrama de Shoeller-Berkaloff de la campaña de Enero de 2008, la cual es representativa ya que no difiere esencialmente de las otras realizadas (Figura 6).

Muestra	pH	C.E.	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	Cl ⁻	PO ₄ ³⁻	TOC	Fe ²⁺	Na ⁺	Ca ²⁺
A Alcalá	7.4	693	39	297	15	<0.05	28	<0.04	<0.5	<0.1	15	73
B Olivera	7.4	692	33	296	12	<0.05	36	<0.04	<0.5	<0.1	21	76
C Majorrego	7.4	2300	370	173	25	<0.05	510	<0.04	4.5	2.4	119	87
D Majavea	7.7	625	36	241	9	<0.05	53	<0.04	<0.5	<0.1	28	54
E IGME I	7.6	469	20	228	10	<0.05	14	<0.04	<0.5	<0.1	6	43
F IGME II	7.6	630	104	247	12	<0.05	11	<0.04	<0.5	<0.1	7	62
G Cabrerizo	7.5	1449	32	262	10	<0.05	412	<0.04	<0.5	0.3	211	77
H Vijan	7.3	507	20	263	19	<0.05	8	<0.04	<0.5	<0.1	5	57
I Ojo Laguna	7.6	566	20	268	16	<0.05	10	<0.04	<0.5	<0.1	6	70
J Berrillo	7.5	723	26	228	13	<0.05	117	<0.04	<0.5	<0.1	68	64
K Peones	7.6	635	30	257	14	<0.05	30	<0.04	<0.5	<0.1	8	53
L Pleito	7.7	567	28	282	18	<0.05	10	<0.04	<0.5	<0.1	6	72
M Rocio	7.6	598	80	236	11	<0.05	10	<0.04	<0.5	<0.1	6	63
N Nina	7.3	665	128	219	10	<0.05	15	<0.04	<0.5	<0.1	10	81
O Llanos	7.4	1356	65	241	29	<0.05	350	<0.04	1.22	0.3	78	89

Tabla 4. Concentraciones máximas para los parámetros físico-químicos seleccionados. (Datos en mg/l excepto C.E. en µS/cm). Campañas de muestreo realizadas en Enero, Abril y Julio de 2008

Table 4. Maximum concentrations for parameters physico-chemistry selectet (Data in mg/l. Conductivity in µS/cm). Campaigns of sampling realized in January, April and July, 2008

Por lo tanto, los análisis químicos realizados parecen coherentes con la evaluación obtenida del riesgo de contaminación de las aguas subterráneas y además, ponen de manifiesto la necesidad de incluir los acuíferos adyacentes en las áreas de protección para las captaciones de agua para abastecimiento humano.

Conclusiones

Como paso previo al desarrollo de una metodología que permita delimitar zonas de salvaguarda con objeto de proteger las aguas subterráneas destinadas al consumo humano se ha evaluado el riesgo de contaminación según una adaptación de la metodología propuesta en la Acción Europea COST 620. Se propone evaluar el riesgo usando el método COP en lugar del PI debido a los satisfactorios resultados obtenidos con este método en acuíferos del Sur de España. El trabajo se ha realizado en acuíferos carbonáticos cuyos recursos hídricos se utilizan para el abastecimiento urbano de diferentes poblaciones, por lo que es de suma importancia su protección.

Los resultados obtenidos indican que la peligrosidad de las actividades contaminantes en el acuífero

carbonatado es baja, aunque existen presiones puntuales y lineales de peligrosidad moderada. Un aspecto que no considera el método utilizado para la determinación de la peligrosidad es el análisis de las presiones por proximidad así como por coincidencia, es decir, la coexistencia de varias presiones iguales en un radio muy pequeño así como la presencia de varias presiones diferentes en una misma zona, en ambos casos se debería aumentar la peligrosidad en esa área.

La vulnerabilidad a la contaminación evaluada mediante el método COP es alta o muy alta. Los valores elevados son coincidentes con los afloramientos calizos lo cual pone de manifiesto el peso que ejerce en el resultado final el parámetro O, el cual depende de la capacidad de protección que de modo natural tiene el acuífero según las capas que constituyen la zona no saturada.

La evaluación del riesgo de contaminación del agua subterránea obtenida en función de los valores de vulnerabilidad y de peligrosidad de las presiones muestra un predominio del riesgo muy bajo de contaminación debido al afloramiento de materiales de baja permeabilidad y la inexistencia de presiones en una gran parte de la zona de estudio. Como complemento al análisis realizado se han

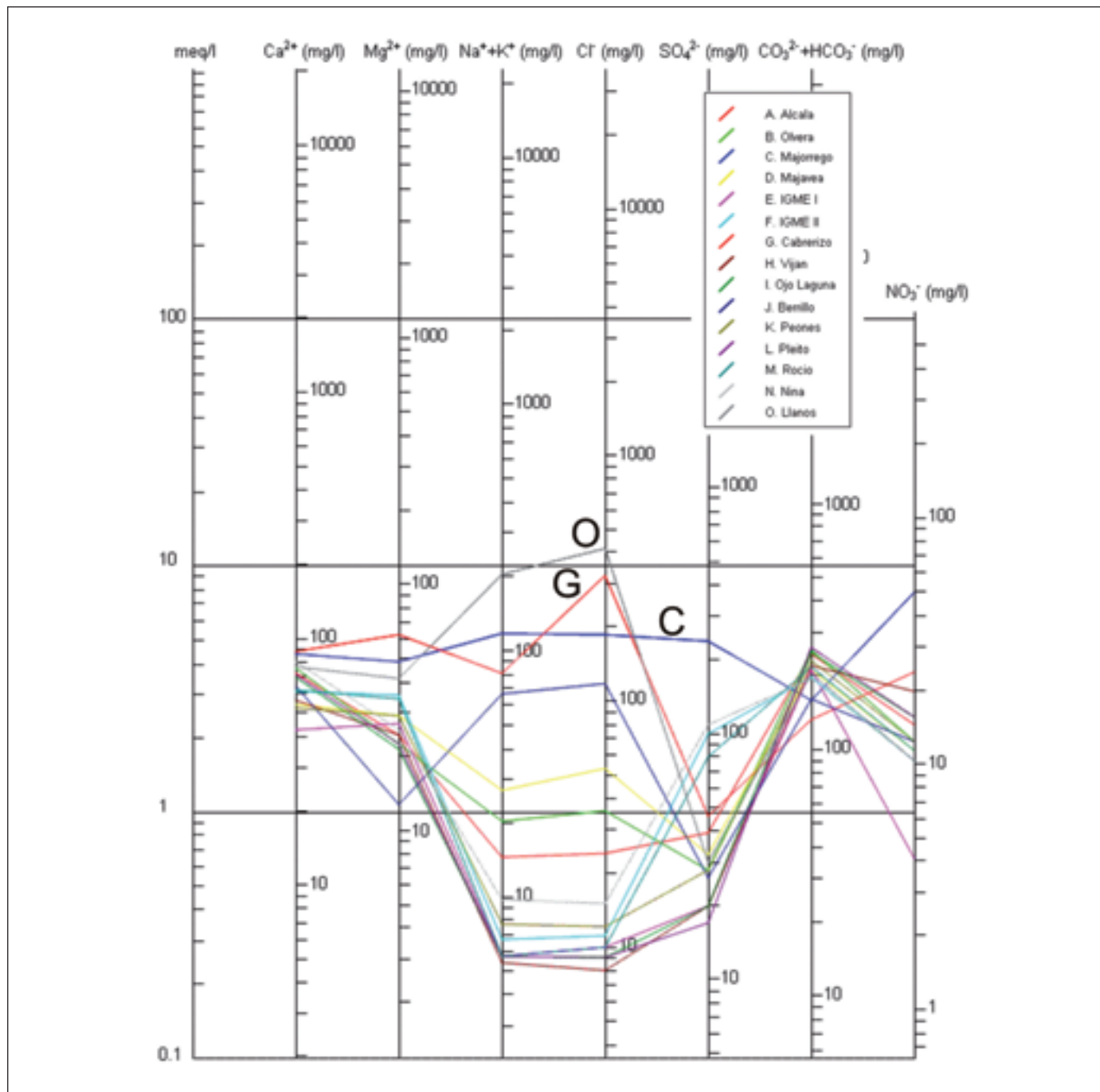


Figura 6. Diagrama de Schoeller-Berkaloff correspondiente a la campaña de Enero de 2008
 Figure 6. Schoeller-Berkaloff diagram correspondent to the campaign of January, 2008

efectuado análisis químicos en manantiales y sondeos distribuidos por todos los acuíferos. Tan sólo en el sector septentrional de la zona estudiada se detectan indicios de contaminación que se considera originada por las presiones existentes en una

masa de agua adyacente, lo cual pone de manifiesto la necesidad de incluir en las zonas de salvaguarda los acuíferos adyacentes a los explotados en el caso en el que exista una conexión hidráulica entre ellos.

Agradecimientos

Es una contribución al Proyecto de I+D CGL2008-04938 del Ministerio de Ciencia e Innovación de España.

Referencias

- Aller, L., Bennett, T., Leer, J., Petty, J. y Hacket, G. 1987. *DRASTIC: A standardised system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings*. US Environmental Protection Agency. Oklahoma, 455 pp.
- Andreo, B., Goldscheider, N., Vadillo, I., Vías, J.M., Neukum C., Brechenmacher, J. Carrasco, F., Hötzl, H., Jiménez, P., Perles, M.J. y Sinreich, M. 2006. Karst groundwater protection. Application of a Pan-European Approach in the pilot site of Sierra de Líbar (South Spain). *Science of the Total Environment*, 357(1-3), 54-73.
- Baldi, E., Guastaldi, E. y Rossetto, R. 2009. Evaluation of intrinsic groundwater vulnerability to pollution: COP method for pilot area of Carrara hydrogeological system (Northern Tuscany, Italy). *General Assembly 2009. European Geosciences Union*, Vienna. Vol. 11, EGU2009-10405-2, 2009.
- Carrasco, F. 1986. *Contribución al conocimiento de la Cuenca alta del río Guadalhorce: El Medio Físico Hidrogeoquímico*. Universidad de Granada, 435 pp.
- Carrasco, A., Carrasco, F., Catalán, F., Jiménez, A., Linares, L., Martínez, C. y Robles, J. 2008. Caracterización hidrogeológica de la Sierra de Cañete (Málaga). Aplicación de la Directiva Marco del Agua. *VII Simposio del Agua en Andalucía*. Agua y Cultura, Tomo I, 283-292
- Civita, M. y de Maio, M. 1997. *SINTACS Un sistema paramétrico per La valutazione e la cartografia della vulnerabilità degli all'inquinamento Metodologia e automazione*. Pitagora Editrice, Bologna, 191 pp.
- Cruz-Sanjulián, J. 1991. *Hoja 1037*. Colección Magna, IGME
- Daly, D., Dassargues, A., Drew, D., Dunne, S., Goldscheider, N., Neale, S., Popescu, I.C. y Zwahlen, F. 2002. Main concepts of the European Approach for (karst) groundwater vulnerability assessment and mapping. *Hydrogeology Journal*, 10 (2), 340-345.
- De Ketelaere, D., Hötzl, H., Neukum, C., Civita, M. y Sappa, G. 2004. Hazard análisis and mapping. In: Zwalen F (ed) *COST Action 620: Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers*. Informe final de la Acción COST 620, 86-105.
- Döerfliger, N. 1996. *Advances in karst groundwater protection strategy using artificial tracer test analysis on a multiattribute vulnerability mapping (EPIK method)*. Tesis doctoral Univ. de Neuchâtel (Suiza), 308 pp.
- Ducci, D. 1999. GIS techniques for mapping groundwater contamination risk. *Natural Hazards*, 20, 279-294.
- Foster, S. 1987. Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy. In: Van Duijvenbooden W y Van Waegeningh H (ed.). *Vulnerability of soil and groundwater to pollution* 38, 69-86.
- Foster, S. y Hirata, R. 1988. *Groundwater pollution risk assessment: a methodology using available data*. WHO-PAHO-CEPIS Technical report (Lima-Peru) 73 pp.
- Gogu, R.C. y Dassargues, A. 2000. Current trends and future challenges in groundwater vulnerability asesment using overly and index methods. *Enviromental Geology*, 39 (6), 549-559.
- Goldscheider, N., Klute, M., Sturm, S. y Höltz, H. 2000. The PI method – a GIS-based approach to mapping groundwater vulnerability with special consideration of karst aquifers. *Zeitschrift fur angewandte geologie*, 46 (3), 157-166.
- Hötzl, H., Delporte, C., Liesch, T., Malik, P., Neukum, C. y Svasta, J. 2004. Risk mapping. In: Zwalen F (ed) *COST Action 620: Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers*. Final report, Office of the Official Publications of the European Communities, Brussels, Belgium, 297 pp.
- Jiménez, A., Sánchez, D., Martínez-Navarrete, C. y Carrasco, F. 2007. La Directiva Marco del Agua y la ordenación del territorio. Aplicación a un sector del noreste de la provincia de Málaga. *Actas del congreso. V Congreso Internacional de Ordenación del Territorio*, Málaga.
- Jiménez Madrid, A., Martínez Navarrete, C. y Carrasco Cantos, F. 2008. Comparative analysis of analitical methods for wellhead protection areas implementation. Application to different types of aquifers in the south of Spain. *GroPro - Groundwater Protection, ATV Jord og Grundvand*, Dinamarca, 67-74.
- Jiménez Madrid, A. 2008. *La protección del agua subterránea destinada a consumo humano y su integración en la ordenación del territorio. Aplicación en la Sierra de Cañete (Málaga)*. Diploma de Estudios Avanzados. Universidad de Granada. Trabajo inédito, 120 pp.
- Jiménez Madrid, A., Carrasco Cantos, F. y Martínez Navarrete, C. 2009. Análisis comparativo de la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca de acuíferos carbonáticos (Sierra de Cañete, provincia de Málaga). *Boletín Geológico y Minero*, 120 (1), 81-94
- Junta de Andalucía 1999. *Mapa de usos y coberturas del suelo. Escala 1:100.000*.
- Junta de Andalucía, Consejería de Obras Públicas y Transportes 2002. *Estudio hidrogeológico de la Sierra de Cañete (Málaga)*. Informe inédito, 271 pp.
- Junta de Andalucía, Consejería de Medio Ambiente, 2005. *Modelo digital de elevaciones de Andalucía 10x10*.
- Linares, L. y Carrasco, A. 2007. Sierra de Cañete. En: Durán J.J (ed.) *Atlas hidrogeológico de la provincia de Málaga*, IGME-DPM, Volumen 2, 60-64.
- Martínez, C., Carrasco, F. y Jiménez, A. 2008. Metodologías para la protección de aguas subterráneas empleadas para consumo humano. En: Vadillo, I. (ed.), *Conceptos y Técnicas en Hidrogeología*, 177-216.
- Ravbar, N. 2007. *The protection of karst waters : a comprehensive Slovene approach to vulnerability and contamination risk mapping*. ZRC Publishing, Ljubljana, 254 pp.
- Sener, E., Sener, S. and Davraz, A. 2009. Assessment of aquifer vulnerability based on GIS anda DRASTIC methods: a case study of the Senirkent-Uluborlu Basin (Isparta, Turkey). *Hydrogeology Journal*, DOI 10.1007/s10040-009-0497-0.

- Unión Europea 2000. Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de Octubre de 2000, por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas. *DO L 327* de 22-12-2000.
- Unión Europea 2006. *Directiva 2006/118/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, relativa a la protección de las aguas subterráneas contra la contaminación y el deterioro.*
- Vías, J.M, Andreo, B. y Perles, M.J. 2004. A comparative study of four schemes for groundwater vulnerability zapping in a diffuse flow carbonate aquifer under Mediterranean climatic conditions. *Environmental Geology*, 47 (4), 586-595.
- Vías, J. 2005. *Desarrollo metodológico para la estimación y cartografía de las aguas subterráneas mediante SIG. Aplicación en acuíferos del sur de España.* Tesis Doctoral Universidad de Málaga, 423 pp.
- Vías, J.M., Neukum, Ch., Hötzl, H. y Andreo, B. 2006a. Statistical comparison and control of different vulnerability mapping methods in Bauschlotter Platte aquifer (Germany). *Proceedings of 8th Conference on Limestone Hydrogeology*. Neuchatel, Sept 2006, 263-266.
- Vías, J.M., Andreo, B., Perles, M.J., Carrasco, F., Vadillo, I. y Jiménez, P. 2006b. Proposed method for groundwater vulnerability zapping in carbonate (karstic) aquifers: the COP method. Application in two pilot sites in Southern Spain. *Hydrogeology Journal*, 14, 912-925.
- Vrba, J. y Zoporozec, A. 1994. *Guidebook on mapping groundwater vulnerability*. Intern. Contr. to Hydrogeology, Hannover, 16, 131 pp.
- Zwahlen F. (ed.) 2004. COST Action 620. *Vulnerability and Risk Mapping for the Protection of Carbonate (Karstic) Aquifers*. Informe final COST Action 620. Brüssel, Luxemburg, European Commission, 297 pp.

Recibido: abril 2009

Revisado: junio 2009

Aceptado: noviembre 2009

Publicado: abril 2010