

Análisis comparativo de la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca de acuíferos carbonáticos (Sierra de Cañete, provincia de Málaga)

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

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

(2) Grupo de Hidrogeología de la Universidad de Málaga. Departamento de Ecología y Geología, Facultad de Ciencias, Universidad de Málaga, Campus de Teatinos, 29071 Málaga.
fcarrasco@uma.es

RESUMEN

Las aguas subterráneas de los acuíferos carbonáticos de la Sierra de Cañete constituyen una fuente básica de abastecimiento para diferentes poblaciones. La evaluación y cartografía de la vulnerabilidad intrínseca a la contaminación es una de las herramientas más útiles para la protección de las masas de agua subterránea, por ello se ha elegido esta zona, para realizar un análisis comparativo, de los resultados obtenidos tras la aplicación de varios métodos, mediante el uso de funciones de análisis espacial y técnicas estadísticas de un Sistema de Información Geográfica. En este trabajo, se han aplicado los métodos DRASTIC Reducido, COP y RISK debido a que, los dos primeros, son los métodos utilizados por el estado español para evaluar la vulnerabilidad de las masas de agua en las cuencas intercomunitarias de todo el territorio nacional, y el último, es el recomendado por el BRGM de Francia para abordar la protección en acuíferos kársticos. Los resultados obtenidos muestran como los métodos COP y RISK, específicos de acuíferos carbonáticos, presentan resultados más acordes con las características de la zona de estudio que los obtenidos con el DRASTIC Reducido, cuya valoración de la zona no saturada provoca menores resultados de vulnerabilidad.

Palabras clave: Acuíferos carbonáticos, Protección de aguas subterráneas, Sierra de Cañete, Sistema de Información Geográfica, Vulnerabilidad

Comparative analysis of the evaluation of the intrinsic vulnerability in carbonate aquifers (Cañete Mountain Range, province of Malaga)

ABSTRACT

Groundwater of the carbonate aquifers of Cañete Mountain Range constitute a basic source for water supply to different populations. Vulnerability intrinsic assesment is one of the most useful tools for the protection of the groundwater bodies, for this reason, this area has been chosen, to realize a comparative analysis, by means of the use of tools of spatial analysis and technical statistics of a Geographical Information System. In this work, Reduced DRASTIC, COP and RISK method have been applied, due to the fact that they are the methods used by Spain, both first ones, to evaluate the vulnerability of the groundwater bodies in the intercommunal basins of the whole national territory, and for BRGM of France, the last one, to approach the carbonate aquifers protection. The obtained results show as the COP and RISK methods, specifics of carbonate aquifers, there show results more according to the characteristics of Cañete Mountain Range that the obtained ones with Reduced DRASTIC, which unsaturated zone valuation causes an undervaluing the results of vulnerability obtained.

Key words: Cañete Mountain Range, Carbonate aquifers, Geographical Information System, Groundwater protection, Vulnerability

Introducción

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), la protección del agua se ha convertido en uno de los objetivos medioambientales prioritarios de las

políticas europeas. Más específicamente, se reconoce la importancia de las aguas subterráneas con la promulgación de la Directiva 2006/118/CE del Parlamento Europeo y del Consejo (Unión Europea, 2006), relativa a la protección de las aguas subterráneas contra la contaminación y el deterioro. Para facilitar el cumplimiento e implantación de la DMA se constituyó en

2003 el "Working Group C" (Unión Europea, 2008). Dentro de éste, se formó el grupo de trabajo "Groundwater protected areas", que ha elaborado una guía (Unión Europea, 2007) que clarifica los requerimientos de la DMA para las áreas protegidas, especialmente las utilizadas para abastecimiento humano.

La vulnerabilidad a la contaminación es la susceptibilidad de un acuífero a que se contamine el agua subterránea debido al impacto de las actividades humanas (Foster, 1987). Se puede distinguir entre vulnerabilidad intrínseca y vulnerabilidad específica (Foster, 1987; Margat y Suais-Parascandola, 1987; Vrba y Civita, 1994). La vulnerabilidad intrínseca es la susceptibilidad del agua subterránea a la contaminación generada por la actividad humana en función de las características geológicas e hidrogeológicas de un acuífero pero independiente de la naturaleza de los contaminantes. Es una propiedad general, no medible y sin dimensión. 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 (Zwahlen, 2004).

El concepto de vulnerabilidad de las aguas subterráneas está basado en un modelo tipo "Origen-Pathway-Target" (Goldscheider, 2002; Daly *et al.*, 2002; Zwahlen, 2004) para la gestión del medio ambiente. El *Origen* corresponde con el lugar donde se infiltra el contaminante, *Pathway* describe el trayecto que sigue el contaminante hasta alcanzar las aguas subterráneas y *Target* representa el agua subterránea que es objeto de protección (Figura 1).

La cartografía de vulnerabilidad es una de las herramientas utilizadas para establecer medidas de

protección en masas de agua cuyos recursos son destinados al abastecimiento de la población. Los mapas de vulnerabilidad a la contaminación son instrumentos muy útiles para la toma de medidas preventivas o correctoras, con respecto al uso del suelo y explotación de los recursos hídricos. Su objetivo es la subdivisión del territorio en categorías según la capacidad que tiene el medio para proteger el agua subterránea. Estos mapas están encaminados a la protección de la masa de agua y no del punto de captación (Unión Europea, 1995; Hötzl, 1996). Desde hace décadas se han desarrollado varios métodos para la determinación de la vulnerabilidad con diferentes enfoques (Aller *et al.*, 1987; Foster, 1987; Dörfliger, 1996; Civita y De Maio, 1997; Gogu y Dessargues, 2000; Goldscheider *et al.*, 2000; Vías *et al.*, 2006; Zwahlen, 2004).

En este trabajo se han aplicado los métodos COP (Vías *et al.*, 2006), DRASTIC Reducido (DGOHCA e IGME, 2002; DGOHCA y CEDEX, 2002) y RISK (Dörfliger, 2005) para la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca a la contaminación de los acuíferos carbonáticos de la Sierra de Cañete, debido a la importancia que tienen sus recursos hídricos para las poblaciones colindantes. Se ha realizado un análisis comparativo de los resultados para ver cual es el método que mejor se adapta a las necesidades de protección de estos acuíferos.

Área de estudio

Localización y marco geológico

La Sierra de Cañete se sitúa, 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 la divisoria entre las cuencas Atlántica y Mediterránea Andaluzas y en ella nacen arroyos que vierten sus aguas a los Ríos Guadalhorce, Corbones y Guadalete.

Las precipitaciones medias anuales varían entre 560 mm en el extremo oriental y 760 mm en su parte meridional. La temperatura media es de 18 °C y el valor medio de la ETP es de 950 mm/año (Junta de Andalucía, 2002).

En la Sierra de Cañete y en 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 los materiales anteriores y hacia los flancos de la sierra, especialmente el occidental, se encuentran arcillas

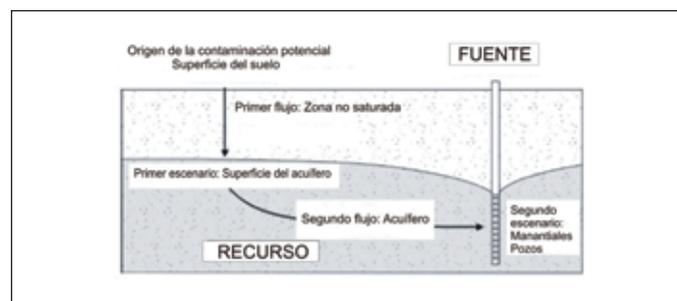


Figura 1. Aproximación europea a la cartografía de vulnerabilidad según el modelo "Origen-Pathway-Target" (Modificado de Zwahlen, 2004)

Figure 1. European approach to the vulnerability mapping according to the model "Origen-Pathway-Target" (Modified of Zwahlen, 2004)

triásicas, dolomías y calizas jurásicas del Subbético que constituyen la mayor parte del área de estudio (Figura 2). Entre ambos dominios y también rodeando a la sierra se encuentran materiales del Flysch del Campo de Gibraltar. El Terciario postorogénico está constituido por calcarenitas, conglomerados y margas del Mioceno superior que afloran en los bordes sur y occidental. Los depósitos cuaternarios (aluviales, formaciones de ladera y travertinos) ocupan también sectores marginales (Linares y Carrasco, 2007).

La estructura geológica que presenta la Sierra de Cañete es un antifirme que integra dos unidades tectónicas 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.

Marco hidrogeológico. Explotación de recursos y necesidad de protección de las aguas subterráneas

El conjunto de rocas carbonáticas jurásicas que afloran en la Sierra de Cañete son permeables por fisuración y karstificación y constituyen diferentes acuíferos (Figura 2). También presentan carácter acuífero las formaciones del Terciario y del Cuaternario que hay sobre las rocas carbonáticas, con las cuales están en continuidad hidrogeológica, y adquieren desarrollo e importancia en algunos sectores del borde de la sierra. Entre estos materiales cabe citar las calcarenis-

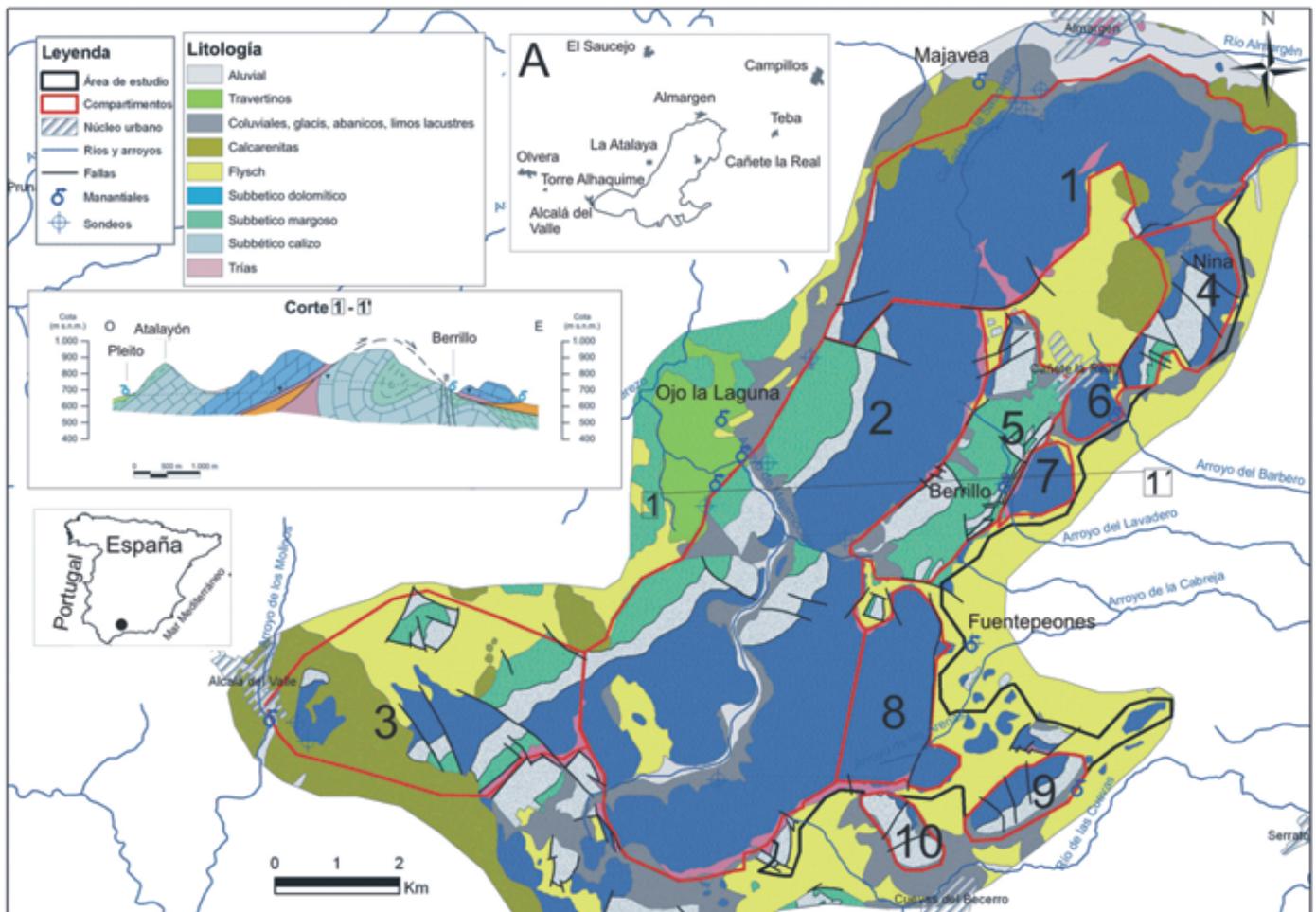


Figura 2. Localización de la Sierra de Cañete y marco geológico e hidrogeológico (Modificado de Linares y Carrasco, 2007). A) Poblaciones abastecidas con agua subterránea de la Sierra de Cañete
 Figure 2. Location of Cañete Mountain Range. Geological and hydrogeological context (Modified of Linares and Carrasco, 2007). A) Populations supplied with groundwater of Cañete Mountain Range

tas y conglomerados del Mioceno de la depresión de Setenil-Ronda, el Cuaternario aluvial de Almargen y los travertinos de La Atalaya. Localmente, pueden dar lugar a acuíferos de menor entidad otros materiales aluviales y depósitos de ladera cuaternarios (Carrasco *et al.*, 2008).

El grado de karstificación en la Sierra de Cañete es, por lo general, bajo. Sólo allí donde afloran las calizas jurásicas de la ventana tectónica existen condiciones topográficas y estructurales favorables para el desarrollo de formas exokársticas. Éstas se manifiestan en forma de lapiares en la Sierra del Padastro y Padrastrillo, desarrollados a favor de fracturas y diaclasas. La piezometría e hidrometría no presenta variaciones significativas, sólo en algunos puntos existen modificaciones atribuibles a la climatología y a una explotación en áreas de bombeo cercanas. Las aguas de la Sierra de Cañete presentan facies hidroquímicas dominantes de tipo bicarbonatado cálcico con poca variación en la composición a lo largo del tiempo (Junta de Andalucía, 2002).

Como formaciones de baja permeabilidad, que pueden originar barreras hidrogeológicas, cabe destacar las arcillas del Trías, los materiales margosos cretácicos del Penibético y las arcillas del Flysch (Junta de Andalucía, 2002).

La característica hidrogeológica fundamental de la Sierra de Cañete es la fragmentación de los afloramientos de las rocas carbonáticas del Jurásico, debido a causas tectónicas, en varios compartimentos de complejas interrelaciones (Junta de Andalucía, 2002). En total, se han definido 10 sistemas (Figura 2). Los recursos de 6 de ellos se utilizan para abastecimiento de 8 poblaciones, de las cuales 1 se encuentra en la provincia de Sevilla, 3 en la de Cádiz y 4 que pertenecen a la provincia de Málaga. Estas poblaciones son de pequeñas dimensiones, la mayoría cuenta con menos de 5.000 habitantes, excepto Campillos que tiene unos 8.000 habitantes.

El compartimento de Almargen (1 en la figura 2) tiene 18,8 km² de extensión, se descarga principalmente por el manantial de Majavea situado en el extremo septentrional de la sierra. El agua del manantial se utiliza para abastecimiento de Campillos. Este compartimento alimenta subterráneamente al aluvial cuaternario de Almargen y es explotado para abastecimiento de la población del mismo nombre y El Saucejo, por medio de bombeos en sondeos.

El compartimento de La Atalaya (2 en la figura 2) es el más extenso de toda la Sierra de Cañete (24 km²), ocupa la mayor parte de la vertiente occidental de la sierra y se descarga principalmente por el manantial del Ojo de la Laguna, cuyos recursos se uti-

lizan para abastecer a la pedanía de La Atalaya (Cañete la Real). Existen otros manantiales de menor entidad. Este compartimento funciona actualmente en régimen natural, ya que no existen en él extracciones de importancia.

El compartimento de Alcalá del Valle (5,3 km², 3 en la figura 2) ocupa el extremo suroccidental de la sierra y se descarga a través de manantiales que, en la actualidad, se encuentran afectados por las extracciones localizadas en sus proximidades, para abastecimiento a Alcalá, Olvera y Torre Alháquime.

En el borde oriental de la sierra se han diferenciado otros compartimentos de menor superficie (ninguno alcanza los 4 km²). Entre ellos cabe destacar los de La Nina (2,5 km²) y Fuentepeones (3,4 km²) (4 y 8, respectivamente, en la figura 2). El primero se aprovecha fundamentalmente para abastecimiento a Teba, mediante sondeos que han provocado la desaparición de los manantiales por los que se producía la descarga. El segundo descarga por varios manantiales, el más significativo de los cuales es el de Fuentepeones, explotado mediante una captación para abastecimiento a Cañete la Real, que afecta el régimen del manantial. Los demás compartimentos tienen superficies inferiores a los 2 km², todos funcionan prácticamente en régimen natural, pues las extracciones son mínimas y descargan por pequeños manantiales y mediante la alimentación subterránea hacia los acuíferos detríticos adyacentes. Entre estos compartimentos cabe destacar el denominado Berrillo-Fuencaliente (5 en la figura 2), el único formado por los materiales carbonáticos del Penibético, que afloran en la ventana tectónica de la sierra de Cañete. Su descarga tiene lugar, fundamentalmente, por el manantial de El Berrillo, cuyas aguas se usan para abastecimiento a Cañete la Real.

Como se ha indicado, los recursos de la Sierra de Cañete tienen una gran importancia para las poblaciones situadas a su alrededor, por lo que se considera necesario establecer medidas de protección que garanticen un suministro de aguas subterráneas en calidad y cantidad adecuada.

Metodología. Cartografía de vulnerabilidad intrínseca a la contaminación

Metodos

La vulnerabilidad de las masas de agua subterránea puede ser determinada a partir de diferentes métodos de cartografía (Gogu y Dessargues, 1998). Estos métodos pueden ser clasificados en tres grandes grupos:

- Modelos de cartografía mediante índices. Están basados en la combinación de cartografías de diversos parámetros (litología, suelo, espesor de la zona no saturada, etc.). Cada parámetro es puntuado cuantitativamente y se les pueden asignar distinto valor de ponderación para determinar el resultado final que es un índice numérico de vulnerabilidad. Son los más utilizados para evaluar la vulnerabilidad intrínseca. Dentro de estos métodos se distinguen tres tipos (Vrba y Zaporozec, 1994; Gogu y Dessargues, 1998):
 - Sistemas jerárquicos. Se basan en la comparación de los datos de una zona con los criterios utilizados para evaluar la vulnerabilidad de otra zona. Son utilizados para evaluar la vulnerabilidad a gran escala.
 - Sistemas paramétricos
 - Métodos de sistemas indexados. Utilizan varios parámetros, cada uno de ellos subdividido en clases, según un rango de valores determinado.
 - Métodos de sistemas matriciales. Métodos utilizados a pequeña escala, que consideran un reducido número de parámetros representativos del área de estudio.
 - Métodos de ponderación y de cuantificación de parámetros. Estos métodos utilizan el mismo procedimiento que los métodos de sistemas indexados y además utilizan índices de ponderación para diferenciar entre los distintos parámetros. A esta categoría corresponden los métodos aplicados en este trabajo.
 - Índice y relaciones analógicas. Basados en la descripción matemática de los procesos hidrológicos e hidrogeológicos.
- Modelos de simulación. Consisten en el uso de ecuaciones numéricas que simulan los procesos de transporte por los que se rigen los contaminantes. Son utilizados para la evaluación de la vulnerabilidad específica.
- Métodos estadísticos. Están basados en una variable que depende de la concentración de contaminante o de una probabilidad de contaminación. Al igual que los modelos de simulación se utilizan mayoritariamente para la evaluación de la vulnerabilidad específica.

Es conveniente destacar que la caracterización de la vulnerabilidad es una aproximación cualitativa y no cuantitativa, por lo que los métodos de evaluación de la vulnerabilidad intrínseca tienen una componente subjetiva que puede influir en el resultado final. Estos métodos se aplican a diferentes escalas para determinar el potencial de contaminación de las aguas

subterráneas, no están estandarizados, por lo que no pueden proporcionar una evaluación única de la vulnerabilidad. Las diferencias entre los mapas de vulnerabilidad de los distintos métodos aplicados reflejan los procedimientos específicos de identificación de parámetros y de su sistema de ponderación y de clasificación.

Métodos aplicados en la Sierra de Cañete

Con objeto de evaluar la vulnerabilidad intrínseca a la contaminación de los acuíferos de la Sierra de Cañete se han aplicado los métodos DRASTIC Reducido (DGOHCA e IGME, 2002; DGOHCA y CEDEX, 2002), COP (Vías *et al.*, 2006) y RISK (Dörfliger, 2005). El primero de ellos se puede aplicar a todo tipo de acuíferos mientras que los dos últimos son específicos de acuíferos carbonáticos. La elección de estos métodos se debe a que el DRASTIC Reducido y COP han sido las metodologías utilizadas por el estado español para determinar la vulnerabilidad de los acuíferos detríticos y carbonáticos, respectivamente, de todas las cuencas intercomunitarias del territorio nacional. El método RISK es el recomendado por el BRGM de Francia en su guía metodología para la protección de los acuíferos kársticos. En todos los métodos aplicados resulta necesario el manejo de herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) para la elaboración de los distintos mapas temáticos (Tabla 1).

1) Método DRASTIC Reducido

El método DRASTIC Reducido (DGOHCA e IGME, 2002; DGOHCA y CEDEX, 2002) fue desarrollado en estudios realizados en las Cuencas del Duero y del Guadalquivir, con objeto de mejorar el conocimiento de los acuíferos y evaluar su vulnerabilidad. Este método propone reducir a cuatro los siete factores originales del método DRASTIC (Aller *et al.*, 1987) para evitar la redundancia derivada de la utilización de información común en la elaboración de los distintos mapas temáticos. En esta línea se manifiestan Foster y Skinner (1995) y Vías (2005) quienes opinan que el método DRASTIC genera un índice de vulnerabilidad de significado poco claro, como consecuencia de la interacción de demasiados parámetros con ponderaciones dudosas. Por otra parte, en el estudio MOPTMA-CE (1994) se concluye que "la consideración de siete factores para evaluar la vulnerabilidad de los acuíferos supone que únicamente un conocimiento muy profundo de la zona de estudio evitará la redundancia del método derivada de la utilización de

la información para la elaboración de las diferentes coberturas", consideración también indicada por Vías (2005).

El método DRASTIC Reducido utiliza solamente cuatro factores, que corresponden a los aspectos básicos a considerar para evaluar la vulnerabilidad intrínseca:

- Suelo vegetal (S)
- Litología de la zona no saturada (L)
- Espesor de la zona no saturada (E)
- Recarga neta (R)

El índice de vulnerabilidad final (V) se calcula mediante la aplicación de la siguiente fórmula:

$$V = 3S + 4L + 5E + 4R$$

Estos parámetros se valoran entre 1-10 de menor a mayor vulnerabilidad, excepto la recarga que se valora entre 1 y 9. Los valores del índice pueden estar comprendidos entre 16 y 156. La Tabla 2 muestra la correspondencia entre los distintos rangos y valores. Este método se diferencia de los demás en que el resultado final no ofrece categorías cualitativas de vulnerabilidad sino que la salida es un índice numérico. Se establecen 10 clases de vulnerabilidad numeradas del 1 al 10, las cuales, con objeto de comparar con los otros métodos, han sido agrupadas en 5 clases desde muy baja a muy alta vulnerabilidad (Tabla 2).

2) Método RISK

El método RISK (Dörfliker, 2005) es exclusivo para aplicar en acuíferos carbonáticos. Tiene en cuenta cuatro parámetros:

- Litología de la zona no saturada (R)
- Infiltración preferencial, epikarst, pendiente y vegetación (I)
- Suelo (S)
- Karstificación (K)

Está inspirado en el método suizo EPIK (Dörfliker, 1996) y en el método RISKE (Petelet *et al.*, 2000). El parámetro Epikarst (E) de ambos métodos es reagrupado en el factor I del RISK (Dörfliker *et al.*, 2004).

Cada parámetro puede ser evaluado entre 0 (baja vulnerabilidad) y 4 (alta vulnerabilidad). El índice de vulnerabilidad global (V) obtenido con el método RISK, en el presente trabajo, varía entre 0 y 4 (Tabla 2). La guía metodológica elaborada para abordar la protección de acuíferos kársticos por el BRGM (Dörfliker, 2005) propone dos sistemas de ponderación diferentes. En las conclusiones de este trabajo se deja abierta la posibilidad de una modificación de estos coeficientes:

$$V = 0,1R + 0,5I + 0,1S + 0,3K \quad (1)$$

$$V = 0,25R + 0,25I + 0,25S + 0,25K \quad (2)$$

En la primera opción propuesta se utilizan factores de ponderación diferentes, donde las características típicas de un karst muy desarrollado (infiltración preferencial y karstificación) supondrían un coeficiente total del 0,8. En el segundo caso se proponen factores iguales para cada uno de los parámetros. Los dos casos han sido aplicados en la Sierra de Cañete, pero debido a su limitado desarrollo kárstico, en este trabajo presentamos los resultados obtenidos tras la aplicación de esta segunda opción para adaptarnos mejor al comportamiento de estos acuíferos.

3) Método COP

El método COP (Vías *et al.*, 2006) fue diseñado para evaluar la vulnerabilidad de los acuíferos carbonáticos a partir de tres factores:

- Concentración de flujo (C)
- Protección del agua subterránea (O)
- Precipitación (P)

El factor O tiene en cuenta la capacidad de atenuación del contaminante ejercida por la zona no saturada en función de, la textura y espesor de suelo, la litología, el espesor de la zona no saturada y el grado de confinamiento del acuífero. El factor C es específico de acuíferos carbonáticos y considera dos escenarios posibles, por un lado diferencia las zonas de infiltración preferenciales del acuífero donde la existencia de conductos y velocidades elevadas de flujo provocan un aumento de la vulnerabilidad, y por otro las áreas donde se produce una infiltración difusa sin una concentración significativa de los flujos del agua de recarga. Para evaluar el factor P hay que tener en cuenta tanto la cantidad como la intensidad de las precipitaciones.

El índice COP se calcula mediante el producto de los tres factores. Sus valores varían entre 0 y 15 y se agrupan en cinco clases de vulnerabilidad, de manera que los índices más bajos indican máxima vulnerabilidad (Tabla 2).

Fuentes de información

En la tabla 1 se recogen todas las fuentes de información utilizadas para evaluar cada uno de los factores de los métodos anteriormente mencionados. Las variables han sido objeto de análisis y tratamiento mediante herramientas de SIG.

MÉTODOS DE VULNERABILIDAD		FUENTES DE INFORMACIÓN Y TRABAJOS REALIZADOS
DRASTIC REDUCIDO	Suelo (S)	Hoja LUCDEME 1037 (1:100.000).
	Litología ZNS (L)	Hoja MAGNA 1037 (1:50.000) (Cruz-Sanjulián, 1991).
	Espesor ZNS (E)	Piezometría red de control Sierra de Cañete (Carrasco <i>et al.</i> , 2008). MDT 10x10 (Junta de Andalucía, 2005).
	Recarga (R)	SIMPA (Estrela <i>et al.</i> , 1999). APLIS (Jiménez Madrid <i>et al.</i> , 2008).
RISK	Roca (R)	Hoja MAGNA 1037 (1:50.000) (Cruz-Sanjulián, 1991).
	Infiltración (I)	Hoja MAGNA 1037 (1:50.000). APLIS (Jiménez Madrid <i>et al.</i> , 2008). Ortofotos.
	Suelo (S)	Hoja LUCDEME 1037 (1:100.000).
	Karstificación (K)	Hoja MAGNA 1037 (1:50.000) (Cruz-Sanjulián, 1991). Análisis geomorfológico de campo. Espeleología. Ortofotos.
COP	Concentración de flujo (C)	Análisis geomorfológico de campo. Espeleología. Ortofotos. Mapa usos del suelo de Andalucía 1:100.000 (Junta de Andalucía, 1999).
	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).
	Precipitación (P)	Agencia estatal de meteorología.

Tabla 1. Fuentes de información y trabajos realizados
 Table 1. Sources of information and realized works

Las fuentes de información utilizadas han sido complementadas con trabajos de campo para la caracterización de los suelos, identificación de litologías, delimitación de zonas de recarga y de áreas de infiltración preferencial así como análisis geomorfológicos y del desarrollo kárstico.

Resultados

En la tabla 2 se muestran los rangos, valores y clases de vulnerabilidad de los distintos métodos aplicados. En función de los rangos del índice de vulnerabilidad se han asignado valores del 1 al 5 en cada uno de los métodos con objeto de poder realizar un estudio comparativo entre ellos.

En la tabla 3 se muestran los parámetros estadísticos de cada uno de los factores de los distintos métodos de vulnerabilidad aplicados en la Sierra de

Cañete así como del índice final. Para el cálculo de los parámetros estadísticos se han utilizado las herramientas de análisis espacial de ArcGis 9.2, las cuales permiten trabajar con capas en formato raster.

Los valores mínimos de vulnerabilidad, según el método DRATIC Reducido (Tabla 3) corresponden a la clase de vulnerabilidad muy baja, representan el 1,8 % de la superficie del área estudiada y se extiende espacialmente allí donde afloran los materiales más impermeables (Figura 3). Los valores más altos, según este método, corresponden a la clase de vulnerabilidad muy elevada que representa sólo el 0,5 % de la superficie estudiada y se localiza en las inmediaciones de los manantiales donde el espesor de la zona no saturada es menor. El valor medio del índice DRATIC Reducido para la Sierra de Cañete es de 80,9 (Tabla 3), por lo que se incluye en la clase de vulnerabilidad moderada. Esta clase comprende los afloramientos de las dolomías del Subbético de permea-

Clases de Vulnerabilidad \ Método	DRASTIC REDUCIDO		RISK		COP	
	Rango del índice de vulnerabilidad	Valor	Rango del índice de vulnerabilidad	Valor	Rango del índice de vulnerabilidad	Valor
Vulnerabilidad Muy Baja	16 – 30	1	0	1	4 – 15	1
	30 – 44	2				
Vulnerabilidad Baja	44 – 58	3	0 – 1	2	2 – 4	2
	58 – 72	4				
Vulnerabilidad Moderada	72 – 86	5	1 – 2	3	1 – 2	3
	86 – 100	6				
Vulnerabilidad Alta	100 – 114	7	2 – 3	4	0,5 – 1	4
	114 – 128	8				
Vulnerabilidad Muy Alta	128 – 142	9	3 – 4	5	0 – 0,5	5
	143 – 156	10				

Tabla 2. Rango, valores y clases de vulnerabilidad de los métodos aplicados
 Table 2. Range, values and classes of vulnerability classes

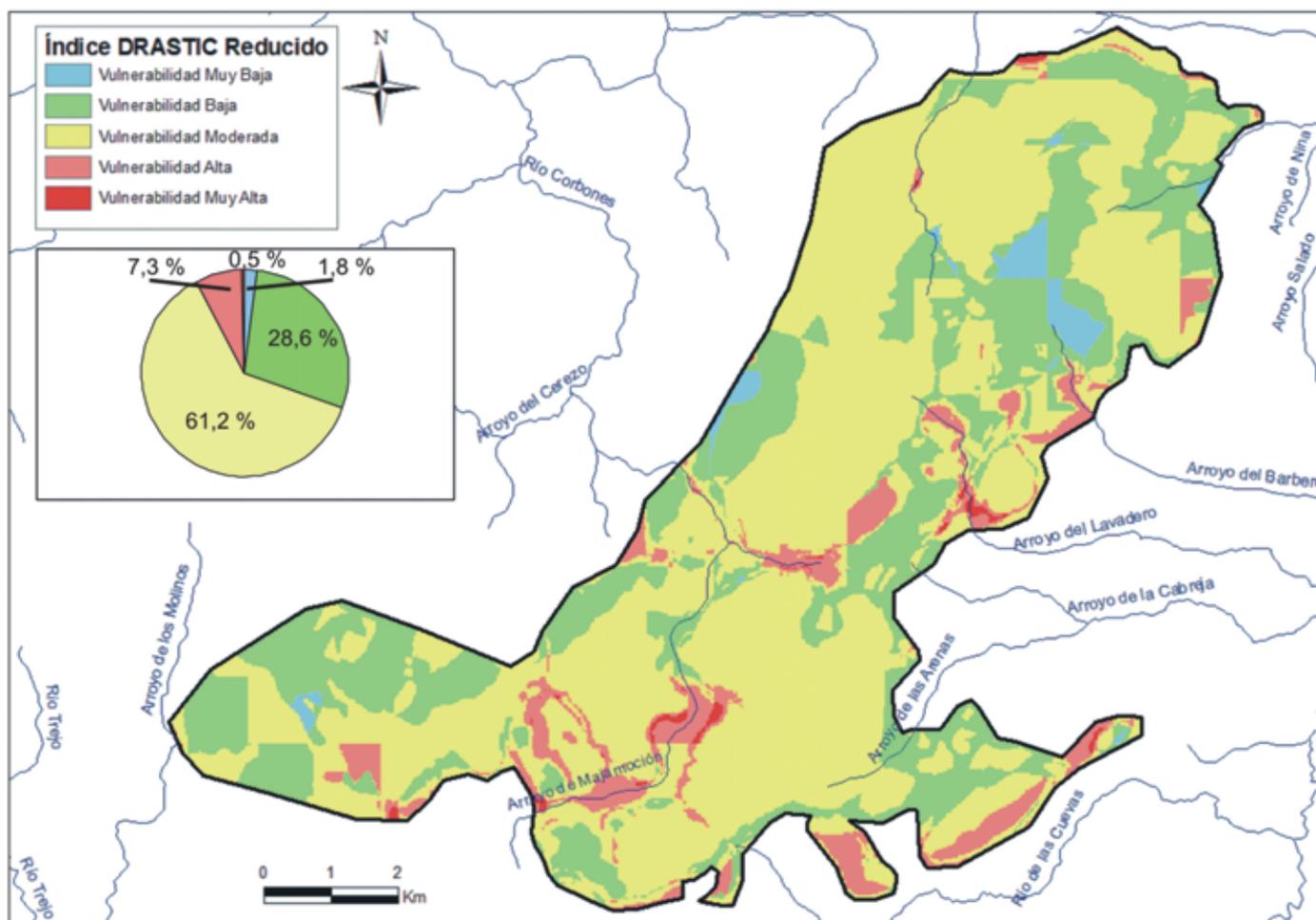


Figura 3. Clases de vulnerabilidad según método DRASTIC Reducido
 Figure 3. Vulnerability classes according to Reduced DRASTIC method

MÉTODOS DE VULNERABILIDAD	PARÁMETROS ESTADÍSTICOS			
	Mínimo	Máximo	Media	Desviación estándar
DRASTIC REDUCIDO	36	144	80,9	17,2
Suelo (S)	3	10	8,3	2,7
Litología ZNS (L)	1	9	6,1	2,9
Espesor ZNS (E)	1	10	1,9	2,5
Recarga (R)	1	9	5,5	1,9
RISK	0,5	3,7	2,3	0,7
Roca (R)	0	4	1,9	1,3
Infiltración (I)	0	4	1,9	0,8
Suelo (S)	2	4	3,3	0,9
Karstificación (K)	0	3	1,2	1
COP	5,1	0,1	1,5	1,4
Concentración de flujo (C)	0,5	0,1	0,3	0,1
Capa Protección (O)	5	1	2,9	1,3
Precipitación (P)	0,7	0,6	0,6	0,02

Tabla 3. Parámetros estadísticos de las variables y del índice final de cada método de vulnerabilidad utilizado

Table 3. Statistical parameters of the variables and of the final index of every method of vulnerability used

bilidad alta-muy alta. Más del 60 % de la superficie está presente dentro de este intervalo, así que es la clase de vulnerabilidad predominante en el área de estudio (Figura 3). Las calizas del Penibético poseen una vulnerabilidad alta, clase poco representada según el DRASTIC Reducido (Figura 3). En relación con este método podemos indicar que el factor que menos influye en la evaluación final de la vulnerabilidad es el suelo, mientras que la litología y la recarga tienen una influencia similar. El espesor de la zona no saturada disminuye la vulnerabilidad ya que es mayor de 30 metros en toda la zona de estudio (míni-

ma vulnerabilidad). Según este parámetro, los espesores altos originan tiempos de tránsitos elevados y esto no es así en los acuíferos carbonáticos debido a la existencia de conductos de circulación rápida.

Los valores mínimos de vulnerabilidad, según el método RISK, corresponden a la clase de vulnerabilidad baja, representan el 8,2 % de la superficie del área estudiada y se localizan en las formaciones de baja permeabilidad del Triásico y del Flysch. Según el índice RISK la clase de vulnerabilidad predominante en la Sierra de Cañete es la alta que representa más del 56 % del territorio (Figura 4). Esta zona se corresponde con el afloramiento de los materiales carbonatados del Subbético y de suelos escasamente desarrollados (leptosoles). La pendiente juega un papel importante en el resultado final del método, ya que las zonas con elevada pendiente disminuyen la infiltración y, por tanto, la vulnerabilidad intrínseca a la contaminación dando lugar a áreas de vulnerabilidad moderada. El modelado kárstico en la Sierra de Cañete se limita a la existencia de campos de lapiaz allí donde afloran las calizas del Penibético y originan una vulnerabilidad muy alta. Se han considerado como zonas de infiltración preferencial las canteras de extracción de áridos existentes en la sierra, ya que se ha comprobado mediante visitas de campo su funcionamiento como dolinas artificiales (Jiménez Madrid, 2008). Las zonas de elevada pendiente y escaso desarrollo del epikarst, limitan la existencia de la clase de vulnerabilidad muy alta.

Los resultados del índice COP en la Sierra de Cañete (Figura 5) muestran la predominancia de las clases de vulnerabilidad muy alta y alta (más del 52 % de ocupación de superficie entre ambas). La abundancia de estas clases de vulnerabilidad se debe a la influencia que ejerce en el resultado final el parámetro O. Las zonas de vulnerabilidad más elevada se corresponden con la abundancia de materiales calizos y de suelos del tipo leptosoles, con escasa cubierta protectora, que disminuyen la protección natural de las aguas subterráneas. En relación con el parámetro P, la altitud media predominante en la Sierra de Cañete junto con la relativa pequeña extensión de la zona de estudio origina que no exista variación en las puntuaciones otorgadas por el método, por lo que influye en menor proporción para obtener diferentes clases de vulnerabilidad. La inexistencia de sumideros importantes en la Sierra de Cañete provoca que el factor C tampoco tenga una influencia excesiva en el resultado final. Las canteras han recibido un tratamiento similar al explicado en el método anterior. Los valores mínimos se corresponden con la clase de vulnerabilidad muy baja (Tabla 3) y ocupan el 11,7 % del área estudiada (Figura 5).

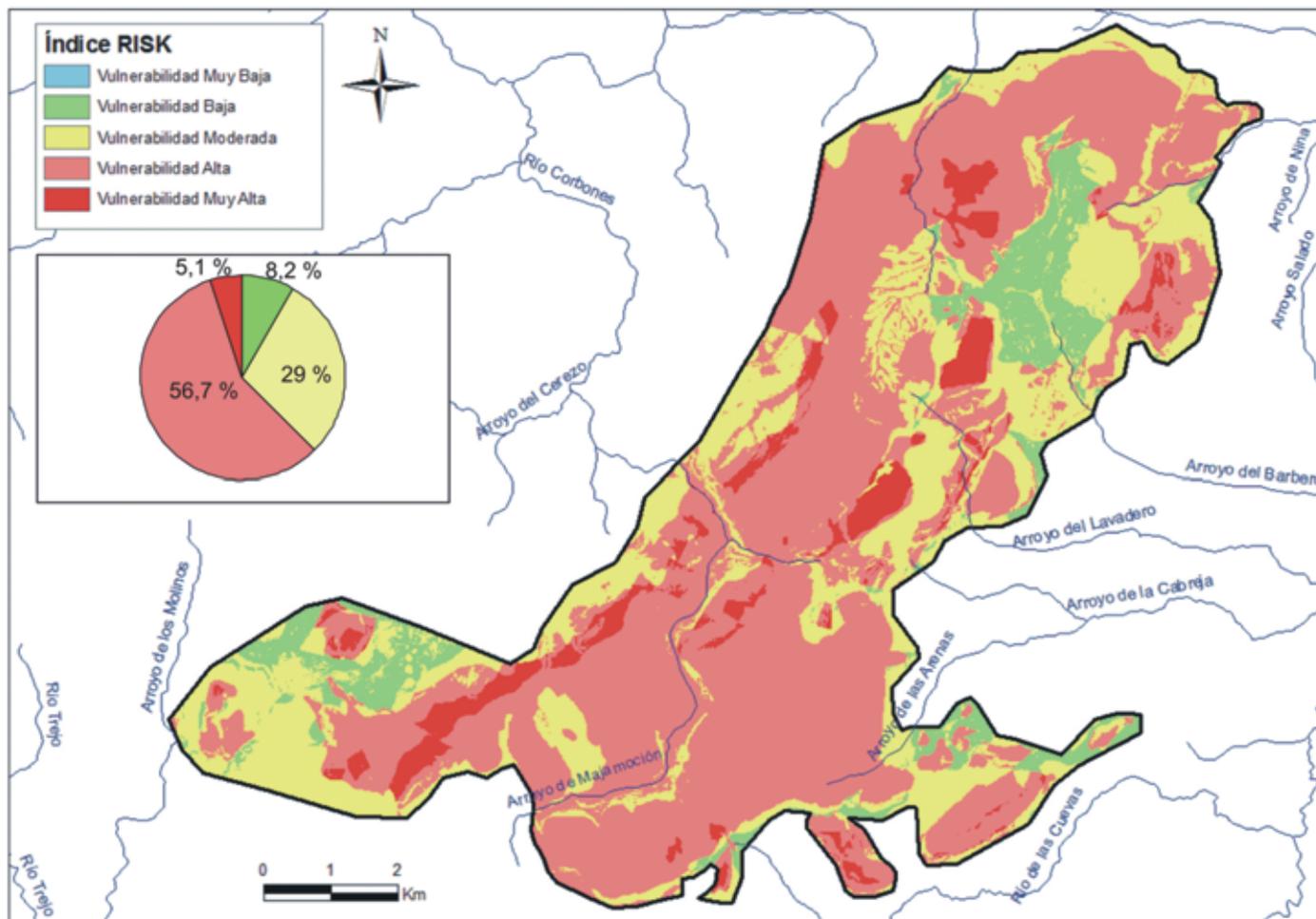


Figura 4. Clases de vulnerabilidad según método RISK
 Figure 4. Vulnerability classes according to RISK method

Análisis comparativo de los resultados

Dos de los métodos aplicados (DRASTIC Reducido y COP) en la Sierra de Cañete para la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca a la contaminación permiten obtener un valor medio de sus índices correspondientes a la clase moderada (Tablas 2 y 3). En el caso del método COP se produce un desvío de la media del índice hacia clases menores debido a los mayores valores absolutos de los materiales de baja permeabilidad. El método RISK proporciona un valor medio de vulnerabilidad alta.

Para los métodos específicos de acuíferos carbonáticos (RISK y COP) las clases de vulnerabilidad que ocupan mayor superficie son las de muy alta y alta, mientras que en el caso del DRASTIC Reducido la clase más extendida es la moderada. Por otro lado, las áreas con vulnerabilidad muy baja son práctica-

mente inexistentes con los métodos DRASTIC Reducido y RISK y en el método COP presentan un porcentaje relativamente alto del área estudiada.

Con objeto de comparar los resultados obtenidos tras la aplicación de los tres métodos, en la tabla 4 se indican los valores medios del índice de vulnerabilidad de cada método del 1 al 5 y los valores medios del índice de vulnerabilidad obtenido en las mismas cuadrículas con los otros dos métodos. Así, en las cuadrículas que con el método DRASTIC Reducido tienen un índice de vulnerabilidad 1, con el método RISK presentan un índice medio de 2,33 y con el método COP presentan un índice de 1,29.

Las clases de vulnerabilidad más baja son prácticamente coincidentes en el espacio aunque no en % de superficie con los tres métodos y corresponden con el afloramiento de materiales de baja permeabilidad. Las clases de vulnerabilidad más elevadas pre-

sentan diferentes resultados según el método aplicado. Así el índice DRASTIC Reducido muestra un predominio de la clase moderada, debido a que dicho método considera el espesor de la zona no saturada como uno de los factores y no las características típicas del modelado kárstico. Tanto el RISK como el COP consideran como zonas de muy alta vulnerabilidad las áreas donde el modelado exokárstico se manifiesta expresamente, como por ejemplo los campos de lapiazes de las Sierras del Padastro y Padastrillo. Estos métodos, específicos de acuíferos carbonáticos, diferencian estas zonas, donde afloran las calizas del Penibético, de las calizas del Subbético, que poseen una vulnerabilidad alta, del resto de área de estudio.

Entre el método RISK y el COP hay ciertas diferencias. El segundo de ellos proporciona mayor importancia a los valores extremos (muy bajos o muy

altos). En el método RISK el tránsito entre las distintas clases de vulnerabilidad es muy suavizado tendiendo siempre hacia valores centrales y no extremos.

Los resultados del análisis estadístico efectuado y resumido en la tabla 4 muestran que en las zonas de vulnerabilidad definidas por el método DRASTIC Reducido presentan según los métodos RISK y COP valores medios de sus índices de vulnerabilidad más elevados y viceversa. Esto es debido a que el método DRASTIC Reducido no considera entre sus parámetros las características típicas de los acuíferos carbonáticos (desarrollo de la karstificación). Entre los resultados obtenidos con los métodos RISK y el COP las grandes diferencias se presentan en las clases de vulnerabilidad extremas, y se observa que la gradación cualitativa del grado de vulnerabilidad propuesta por el método RISK es menos brusca que la del

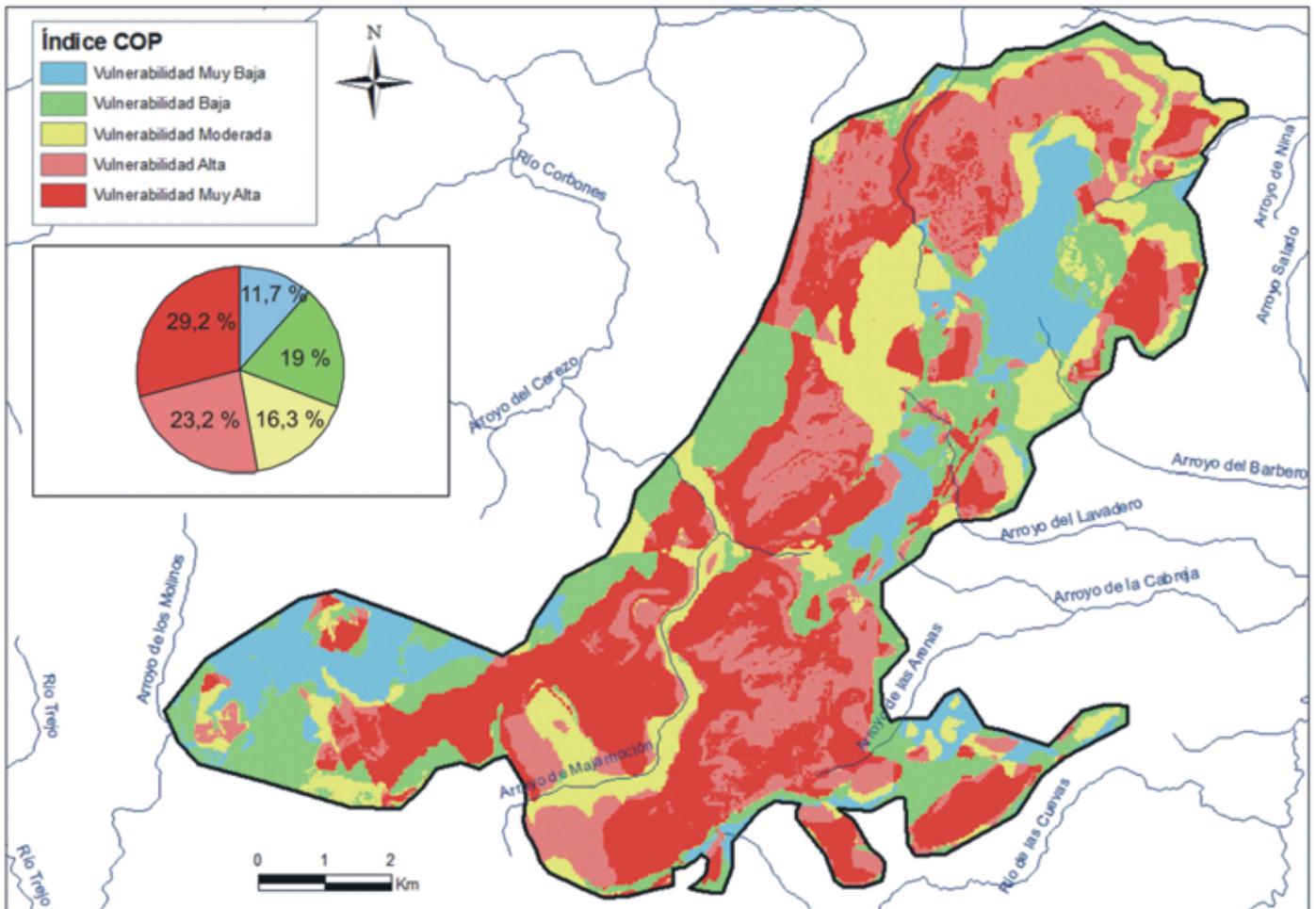


Figura 5. Clases de vulnerabilidad según método COP
 Figure 5. Vulnerability classes according to COP method

	DRASTIC Red					RISK				COP				
VALOR	1	2	3	4	5	2	3	4	5	1	2	3	4	5
DRASTIC Reducido	1	2	3	4	5	2,01	2,51	2,95	3,15	2,02	2,34	2,82	2,94	3,13
RISK	2,33	3,08	3,85	3,87	3,81	2	3	4	5	2,34	3,11	3,44	4,02	4,15
COP	1,29	2,07	3,91	4,08	4,33	1,12	2,21	4,18	4,81	1	2	3	4	5

Tabla 4. Índice de vulnerabilidad medio de cada método y valores medios de vulnerabilidad en los otros dos métodos
 Table 4. Average index of vulnerability of every method and average values of vulnerability in other two methods

método COP. Así, la clases de vulnerabilidad muy baja y muy alta del método COP se convierten en baja y en alta respectivamente en el RISK lo cual confirma la tendencia hacia valores centrales de este método debido a que la Sierra de Cañete no es muy kárstica, lo que ha determinado la fórmula de ponderación utilizada para la obtención del índice de vulnerabilidad.

Conclusiones

La evaluación y cartografía de la vulnerabilidad intrínseca a la contaminación es una herramienta muy útil para la protección de las masas de agua subterránea. Se han elegido los acuíferos carbonáticos de la Sierra de Cañete para la aplicación de tres métodos. Uno de ellos se suele utilizar para otro tipo de medios (DRASTIC Reducido), por lo que no consideran las características de los acuíferos kársticos. La evaluación del espesor de la zona no saturada provoca una disminución de la vulnerabilidad en este tipo de medios, ya que a partir de 30 m considera la mínima vulnerabilidad al establecer que el citado espesor constituye la máxima protección de la masa de agua subterránea. En futuros trabajos sería conveniente analizar la sustitución del factor E del método DRASTIC Reducido por un factor de infiltración que considere las particularidades y heterogeneidades de los acuíferos carbonáticos, como la existencia de zonas de infiltración preferencial que aumentan considerablemente la vulnerabilidad, para así obtener resultados más acordes a este tipo de medios.

Los otros dos métodos aplicados, RISK y COP consideran las particularidades de los acuíferos carbonáticos al tratar de manera específica aquellas zonas

donde se produce una infiltración preferencial. Con estos métodos, el afloramiento de los materiales carbonáticos y la práctica inexistencia de suelo, provocan que la protección sea reducida, por ello, los resultados muestran un predominio de las clases de vulnerabilidad más elevadas. Entre ellos se han observado algunas diferencias como la no consideración de la variable climática en el método RISK. Este método, es más fácil de aplicar y muestra una tendencia hacia valores centrales de su índice, lo cual es debido al uso de coeficientes iguales para cada uno de los parámetros analizados en este trabajo, una vez constatado el limitado desarrollo kárstico existente.

El método RISK permite una mayor gradación de los sistemas kársticos según el desarrollo de la karsificación debido a la flexibilidad que muestra para la adaptación de coeficientes según las distintas casuísticas que se puedan presentar. Para ello es necesario un conocimiento profundo del comportamiento hidrogeológico del sistema. Por otro lado el método COP necesita un trabajo más específico y detallado para puntuar cada uno de los factores.

Para la comparación de los distintos resultados obtenidos con diferentes métodos es importante el uso los Sistemas de Información Geográfica, mediante el empleo de herramientas de análisis espacial y de técnicas estadísticas.

Agradecimientos

Este trabajo es una contribución al Proyecto de I+D CGL2008-04938 del Ministerio de Ciencia e Innovación de España. Se agradece a Héctor Aguilera su contribución en el análisis estadístico.

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.
- 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*, Baeza, Tomo I, 283-292.
- Civita, M. y de Maio, M. 1997. *SINTACS Un sistema paramétrico per La valutazione e la cartografia della vulnerabilità degli inquinamento Metodologia e automazione*. Pitagora Editrice, Bologna, 191 pp.
- Cruz-Sanjulián, J. 1991. *Hoja 1037 (Teba) del Mapa Geológico Nacional a Escala 1:50.000*. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid.
- Daly, D., Dessargues, A., Drew, D., Dunne, S., Godscheider, 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.
- DGOHCA e IGME, 2002. *Cartografía de vulnerabilidad de acuíferos subterráneos a la contaminación en la cuenca hidrográfica del Guadalquivir*. Informe inédito. IGME, Madrid.
- DGOHCA y CEDEX, 2002. *Cartografía de vulnerabilidad de acuíferos subterráneos a la contaminación en la cuenca hidrográfica del Duero*. Informe inédito. CEDEX, Madrid.
- Dörfliger, N. 1996. *Advances in karst groundwater protection strategy using artificial tracer test analysis on a multiattribute vulnerability mapping (EPIK method)*. Tesis doctoral, Universidad de Neuchâtel (Suiza), 308 pp.
- Dörfliger, N., Jauffret, D. y Loubier, S. 2004. *Cartographie de la vulnérabilité des aquifères karstiques en Franche Comté, avec la collaboration de V. Petit*. Rapport BRGM RP-53576-FR.
- Dörfliger, N. 2005. *Guide méthodologique, cartographie de la vulnérabilité en vue de la délimitation des périmètres de protection en milieu karstique*. Annexe du rapport BRGM/RP-53576-FR.
- Estrela, T., Cabezas, F. y Estrada, F. 1999. La evaluación de los recursos hídricos en el Libro Blanco del Agua en España. *Ingeniería del Agua*, 6 (2), 125-138.
- Foster, S. 1987. Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy. En: Van Duijvenbooden W y Van Waegeningh H (ed.), *Vulnerability of soil and groundwater to pollution* 38, 69-86.
- Foster, S. y Skinner, A. 1995. Groundwater protection: the science and practice of land surface zoning. En: Kovar, K. y Krásný, J. (ed.), *Groundwater quality, remediation and protection*. International Association of Hydrological Sciences (IAHS). Publ. 225.
- Gogu, R. y Dessargues, A. 1998. *Sensitivity analysis for the EPIK vulnerability assessment in a local karstic aquifer*. Workshop: Vulnérabilité et protection des eaux karstiques. Neuchâtel (Suisse).
- Gogu, R.C. y Dessargues, A. 2000. Current trends and future challenges in groundwater vulnerability assessment using overly and index methods. *Environmental 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 für angewandte Geologie*, 46 (3), 157-166.
- Goldscheider, N. 2002. *Hydrogeology and vulnerability of karst systems. Examples from the Northern Alps and Swabian Alb*. Dissertation Universität Karlsruhe, Fakultät für Bio. *Geowissenschaften*, 236.
- Hötzl, H. 1996. Scientific basis for karst groundwater protection: guidelines and regulations. *Recursos Hídricos en Regiones Kársticas*, Proc. of the Conference in Vitoria-Gasteiz, 147-158.
- 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)*. Trabajo inédito. Diploma de Estudios Avanzados, Universidad de Granada.
- Jiménez Madrid, A., Martínez Navarrete, C. y Carrasco Cantos, F. 2008. Estimación de la recarga mediante el método APLIS en los acuíferos de la Sierra de Cañete (Málaga). *VII Simposio del Agua en Andalucía. Agua y Cultura*, Baeza, Tomo I, 293-303.
- Junta de Andalucía, 1999. *Mapa de usos del suelo y coberturas vegetales de Andalucía*.
- Junta de Andalucía, 2000. *Estudio hidrogeológico de la Sierra de Cañete (Málaga)*. Consejería de Obras Públicas y Transportes, Informe inédito.
- Junta de Andalucía, 2005. *Modelo digital de elevaciones de Andalucía 10x10*. Consejería de Medio Ambiente.
- Linares, L. y Carrasco, A. 2007. Sierra de Cañete. En: Durán, J.J. (ed.), *Atlas hidrogeológico de la provincia de Málaga*. IGME-DPM, 2, 60-64.
- Margat, J. y Suasis-Parascandola, M.F. 1987. Mapping the vulnerability of groundwater to pollution, some lessons from experience in Fracne. En: W. Van Duijvenbooden y H.G. Van Waegeningh (ed.), *Vulnerability of soil and groundwater to pollutants*, The Hague, 433-436.
- MOPTMA-CE, 1994. *Inventario de recursos de agua subterránea en España*. 2ª Fase: Vulnerabilidad de acuíferos. Cuenca del Guadalquivir
- Petelet Giraud, E., Dörfliger, N. y Crochet, P. 2000. RISKE: Méthode d'évaluation multicritère de la cartographie de la vulnérabilité des aquifères karstiques. Applications aux systèmes des Fontanilles et Cent-Fonts (Hérault, France), *Hydrogéologie*, 4, 71-88.
- Unión Europea, 1995. *Hydrogeological aspects of groundwater protection in karstic areas, Final report (COST action 65)*. European Commission, Directorate-General XII Science, Research and Development, Report EUR 16547 EN, Brussels, Luxembourg, 446 pp.
- 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, de 12 de diciembre de 2006, rela-

- tiva a la protección de las aguas subterráneas contra la contaminación y el deterioro. DO L 372 de 27-12-2006.
- 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., Andreo, B., Perles, M.J., Carrasco, F., Vadillo, I. y Jiménez, P. 2006. 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*. International Contributions to Hydrogeology, 16, 131 pp.
- Vrba, J. y Civita, M. 1994. Assessment of groundwater vulnerability. En: J. Vrba y A. Zaporozec (ed.), *Guidebook on mapping Groundwater vulnerability*. IAH, Verlag Heinz Heise, Hannover, 31-48.
- Zwahlen, F. (ed.) 2004. COST Action 620. *Vulnerability and Risk Mapping for the Protection of Carbonate (Karstic) Aquifers*. Informe final COST Action 620. European Commission, Brüssel, Luxemburg, 297 pp.

Recibido: abril 2009

Revisado: junio 2009

Aceptado: julio 2009

Publicado: julio 2009